



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

---

# **MODELACIÓN HIDRODINÁMICA Y DE CALIDAD DE AGUA DEL SISTEMA INTEGRADO EMBALSE MUÑA-RÍO BOGOTÁ**

**Sergio Armando Barbosa Casas**

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá, Colombia

2013



# **MODELACIÓN HIDRODINÁMICA Y DE CALIDAD DE AGUA DEL SISTEMA INTEGRADO EMBALSE MUÑA-RÍO BOGOTÁ**

**Sergio Armando Barbosa Casas**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

**Maestría en Ingeniería – Recursos Hidráulicos**

Director:

Ph.D Luis Alejandro Camacho Botero

Codirector:

Ph.D Pedro Mauricio Avellaneda López

Línea de Investigación:

Modelación de fenómenos y amenazas naturales

Grupo de Investigación:

El Grupo de Investigación en Ingeniería de Recursos Hídricos

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá, Colombia

2013



*A Dios y a mis padres que me brindaron el apoyo necesario para lograrlo. A mis hijos Esteban y Santiago que me dieron la fuerza para seguir adelante en los momentos difíciles. Por ellos y para ellos.*

*"Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica,  
esa fuerza es la voluntad."*

*Albert Einstein*



## Agradecimientos

Debo agradecer de manera muy especial y sincera a mi amigo y Profesor *Luis Alejandro Camacho Botero* por aceptarme para realizar esta tesis bajo su dirección]. Su ayuda y confianza no solamente en el desarrollo de esta tesis, sino también en mi formación como estudiante fueron fundamentales para obtener este logro. También al Profesor Pedro Mauricio Avellaneda por aceptar participar como Co-director de la tesis en este proceso.

A mi amigo el Ingeniero Miguel Alejandro Jiménez por su ayuda y monitoria en el desarrollo de esta tesis.

A mis *padres*, hermanos e hijos que día a día me brindaron su apoyo incondicional y a quienes debo este triunfo profesional, por todo su trabajo y dedicación para darme una formación académica y sobre todo humanista y espiritual. De ellos es este triunfo y para ellos es todo mi agradecimiento.

A Patricia quien me brindó su amor, su cariño y estímulo constante en este proceso, además, su compañía y comprensión son evidencia de su gran amor.

A los que nunca dudaron que lograría este triunfo

Gracias





## Resumen

Se ha demostrado que la modelación hidrodinámica y de calidad de agua es una herramienta muy útil para observar el comportamiento de diferentes cuerpos de agua bajo condiciones internas y externas actuantes. El objetivo principal de esta investigación fue modelar el comportamiento hidrodinámico y de calidad del agua en el embalse del Muña. Se utilizaron los programas de computador COHERENS, MOHID y LAKE2K. Estos modelos se implementaron en el embalse bajo diferentes escenarios por un periodo de simulación de 30 días (720 horas) permitiendo representar los principales fenómenos de transporte y transferencia bioquímica de las aguas residuales de la ciudad de Bogotá. El análisis de los resultados para los dos primeros modelos muestra claramente la influencia del viento en la hidrodinámica general del embalse. Por otra parte se encontró que el Muña está en capacidad de asimilar una fracción alta de carga contaminante. Lo anterior independientemente del escenario seleccionado como tratamiento para las aguas residuales de la ciudad de Bogotá. Por último, la modelación con L2K evidenció el consumo de oxígeno debido a los sedimentos y la estratificación que se presenta en el embalse del Muña.

**Palabras clave:** modelación hidrodinámica, modelación de calidad del agua, determinantes de calidad de agua, asimilación de contaminantes, demanda béntica de oxígeno.

## Abstract

There has been demonstrated that the hydrodynamic modeling and of water quality it is a very useful tool to observe the behavior of different bodies of water under internal and external acting conditions. The main objective of this research was to model the hydrodynamics and water quality behavior at the Muña reservoir. The computer programs used were COHERENS, MOHID and LAKE2K. These models were implemented in the reservoir under different scenarios for a simulation period of 30 days (720 hours) allowing to represent the main transport and biochemical transfer phenomena of sewage from the city of Bogotá. The analysis of the results for the first two models shows clearly the influence of wind in the general hydrodynamics of the reservoir. Moreover it is found that the Muña is able to absorb a high fraction of pollutant load. This regardless of the scenario selected as a treatment for wastewater from the Bogotá city. Finally, modeling with L2K showed oxygen consumption due to sediments present and stratification that occurs in the Muña reservoir.

**Keywords:** hydrodynamic modeling, water quality modeling, water quality determinants, pollutants assimilation, sediment oxygen demand.

# Contenido

	Pág.
<b>Resumen.....</b>	<b>IX</b>
<b>Lista de figuras.....</b>	<b>XIII</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>16</b>
<b>1. Introducción .....</b>	<b>17</b>
1.1 Generalidades .....	17
1.2 Definición del Problema .....	17
1.3 Antecedentes.....	18
1.4 Justificación .....	21
1.5 Objetivos.....	22
1.5.1 General .....	22
1.5.2 Específicos.....	22
1.6 Metodología.....	23
1.6.1 Familiarización con los diferentes proyectos .....	23
1.6.2 Entendimiento y pruebas a priori de los modelos a implementar .....	23
1.6.3 Obtención e implementación de la información .....	23
1.6.4 Protocolo de modelación .....	24
1.6.5 Aplicación de los modelos .....	25
1.6.6 Análisis de resultados, conclusiones y recomendaciones .....	25
1.7 Resultados principales.....	26
1.8 Resumen del contenido .....	26
<b>2. Revisión de modelos hidrodinámicos y de calidad de agua, y definición de la demanda béntica de oxígeno .....</b>	<b>29</b>
2.1 Introducción .....	29
2.2 Modelo COHERENS.....	30
2.2.1 Descripción del modelo .....	31
2.2.2 Características del programa .....	31
2.2.3 Física del modelo .....	32
2.2.4 Limitaciones del modelo.....	36
2.3 Modelo MOHID .....	37
2.3.1 Descripción de los modelos principales de MOHID .....	38
2.3.2 Propiedades principales .....	43
2.3.3 MOHID Agua.....	43
2.4 DEMANDA BENTICA .....	60
2.4.1 Aspectos Generales.....	60
2.4.2 Observaciones .....	61

2.4.3	LAKE 2K.....	63
2.5	Conclusiones.....	68
<b>3.</b>	<b>Aplicación de los modelos COHERENS, MOHID y LAKE2K al embalse del Muña</b>	<b>69</b>
3.1	Introducción.....	69
3.2	Descripción de la zona de estudio.....	70
3.3	Información utilizada .....	71
3.3.1	Batimetría .....	71
3.3.2	Series de viento.....	73
3.3.3	Caudales de bombeo y de turbinación.....	74
3.3.4	Calidad de agua.....	75
3.3.5	Datos adicionales .....	75
3.4	Tiempo de simulación.....	76
3.5	Escenarios de simulación.....	77
3.6	Modelo COHERENS .....	78
3.6.1	Modificaciones al código COHERENS.....	78
3.6.2	Graficador (Visual Basic) .....	79
3.7	Modelo MOHID.....	79
3.7.1	Prueba de los modelos con series sintéticas .....	80
3.8	Modelo LAKE2K (L2K) .....	84
3.9	Conclusiones.....	84
<b>4.</b>	<b>Asimilación de la demanda béntica de oxígeno (SOD) .....</b>	<b>85</b>
4.1	Introducción.....	85
4.2	Análisis de la Modelación con MOHID (módulo Benthos).....	86
4.3	Análisis de la Modelación con LAKE2K.....	88
4.4	Conclusiones.....	94
<b>5.</b>	<b>Análisis de los resultados de la simulación de escenarios en el Embalse.....</b>	<b>96</b>
5.1	Introducción.....	96
5.2	Análisis de resultados modelo COHERENS.....	96
5.3	Análisis de resultados modelo MOHID .....	103
5.4	Conclusiones.....	116
<b>6.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>119</b>
6.1	Conclusiones generales .....	119
6.2	Conclusiones por objetivos.....	119
6.3	Conclusiones del montaje de los modelos COHERENS, MOHID y LAKE2K.....	120
6.4	Conclusiones de la asimilación de la demanda béntica de oxígeno (SOD).....	121
6.5	Conclusiones Análisis de los resultados de la simulación de escenarios en el embalse del Muña.....	122
6.5.1	Hidrodinámica.....	122
6.5.2	Calidad de agua.....	122
6.6	Recomendaciones.....	123
<b>Anexos.....</b>		<b>125</b>
<b>A.</b>	<b>Datos hidrodinámicos y de calidad de agua.....</b>	<b>127</b>
<b>B.</b>	<b>Código programa Visual Basic y MATLAB .....</b>	<b>161</b>

<b>Bibliografía .....</b>	<b>169</b>
---------------------------	------------

## Lista de figuras

Figura 1-1 Protocolo de modelación [Camacho, 2001] .....	24
Figura 2-1 Estructura jerárquica del marco de MOHID [Barreto <i>et al.</i> 2009] .....	38
Figura 2-2 Relaciones de dependencia entre módulos Mohid Base 1 [Barreto <i>et al.</i> 2009]. .....	40
Figura 2-3 Dependencias entre módulos de la biblioteca Mohid Base 2 [Barreto <i>et al.</i> 2009]. .....	41
Figura 2-4 Esquema de MOHID Water: principales módulos involucrados [Barreto <i>et al.</i> 2009]. .....	44
Figura 2-5 Relación de dependencia entre módulos de MOHID Water [Barreto <i>et al.</i> 2009]. .....	46
Figura 2-6 Esquema de coordinación entre módulos de la ejecución [Barreto <i>et al.</i> 2009]. .....	47
Figura 2-7 Muestra la dependencia del módulo Hydrodynamic con otros módulos [Barreto <i>et al.</i> 2009]. .....	49
Figura 2-8 Muestra la dependencia del módulo Lagrangian con otros módulos [Barreto <i>et al.</i> 2009]. .....	50
Figura 2-9 Muestra la dependencia del módulo WaterProperties con otros módulos [Barreto <i>et al.</i> 2009] .....	51
Figura 2-10 Muestra la dependencia del módulo WaterQuality con otros módulos [Barreto <i>et al.</i> 2009]. .....	52
Figura 2-11 Muestra la dependencia del módulo Surface con otros módulos [Barreto <i>et al.</i> 2009]. .....	53
Figura 2-12 Información de flujo entre Bentos módulo y los otros módulos [Technical University of Lisbon, 2011] .....	55

Figura 2-13 Balance hídrico y esquema de segmentación vertical en LAKE2K [Chapra <i>et al.</i> , 2011] .....	64
Figura 2-14 Componentes de intercambio de calor de superficie [Chapra <i>et al.</i> , 2011] ...	65
Figura 2-15 Esquema del modelo de flujo de SOD-nutrientes de los sedimentos [Pelletier, Chapra, 2006] .....	67
Figura 3-1 Ubicación del Embalse del Muña [Díaz, 2004] .....	70
Figura 3-2 Descripción general del Embalse [EMGESA <i>et al.</i> , 2005] .....	71
Figura 3-3 Batimetría embalse del Muña (generada por MOHID).....	72
Figura 3-4 Embalse del Muña y ubicación de la estación climatológica [EMGESA <i>et al.</i> , 2005].....	73
Figura 3-5 Curva de capacidad total .....	76
Figura 3-6 Series de Caudal .....	80
Figura 3-7 Hidrodinámica en el Embalse con MOHID .....	81
Figura 3-8 Series sintéticas de determinantes de calidad de agua.....	83
Figura 4-1 Concentración de oxígeno Condición de frontera crítica (Caudal alto - Concentración mínima) .....	86
Figura 4-2 Concentración de oxígeno Condición de frontera crítica (Caudal bajo – Concentración máxima) “condición actual” .....	87
Figura 4-3 Concentración de oxígeno Condición de frontera crítica (Caudal bajo – Concentración máxima) “escenarios restantes” .....	87
Figura 4-4 Valor de demanda béntica escenarios Condición de frontera crítica (Caudal alto - Concentración mínima) .....	88
Figura 4-5 Valor de demanda béntica escenario Condición de frontera crítica (Caudal bajo – Concentración máxima) “condición actual” .....	89
Figura 4-6 Valor de demanda béntica escenarios Condición de frontera crítica (Caudal bajo – Concentración máxima) “escenarios restantes” .....	90
Figura 4-7 Perfil de temperatura escenarios Condición de frontera crítica (Caudal alto - Concentración mínima) .....	93
Figura 4-8 Perfil de temperatura escenarios Condición de frontera crítica (Caudal bajo - Concentración máxima) .....	94
Figura 5-1 Distribución espacial de la concentración de un contaminante (hora 7) .....	97
Figura 5-2 Distribución espacial de la concentración de un contaminante (hora 53) .....	97
Figura 5-3 Vectores de velocidad en el Embalse (registro horario de bombeo).....	98

---

Figura 5-4 Vectores de velocidad en el Embalse zona superior (registro horario de bombeo).....	99
Figura 5-5 Vectores con magnitud mayor en la zona de descarga .....	104
Figura 5-6 Vectores con magnitud mayor en la zona de bombeo .....	104
Figura 5-7 Dirección del flujo en el Embalse.....	105
Figura 5-8 Dirección predominante del viento en el Embalse .....	105
Figura 5-9 Comparación de velocidades modelos COHERENS y MOHID.....	106
Figura 5-10 Cargas de entrada y salida escenarios en condición de frontera crítica (Caudal alto - Concentración mínima) .....	107
Figura 5-11 Cargas de entrada y salida escenario de simulación en Condición de frontera crítica (Caudal bajo – Concentración máxima) “condición actual” .....	109
Figura 5-12 Cargas de entrada y salida escenarios de simulación Condición de frontera crítica (Caudal bajo – Concentración máxima) “escenarios restantes” .....	110

## Lista de tablas

	Pág.
<b>Tabla 2-1</b> Comparación de los modelos COHERENS y MOHID .....	59
<b>Tabla 2-2</b> Variables de estado del modelo [Chapra <i>et al.</i> , 2011].....	66
<b>Tabla 3-1</b> Caudales de bombeo en Alicachín [EMGESA <i>et al.</i> , 2005] .....	74
<b>Tabla 3-2</b> Concentraciones iniciales en el Embalse (mg/l) [EMGESA <i>et al.</i> , 2006] .....	75
<b>Tabla 4-1</b> Valores de demanda béntica sedimentos embalse del Muña [EMGESA <i>et al.</i> , 2006].....	91
<b>Tabla 4-2</b> Valores de demanda béntica de oxígeno [Chapra, 1997].....	92
<b>Tabla 5-1</b> Concentraciones iniciales del modelo .....	100
<b>Tabla 5-2</b> Datos de concentración de entrada al Embalse .....	101
<b>Tabla 5-3</b> Resultados obtenidos modelo COHERENS. Escenario en Condición de frontera crítica (Caudal bajo- Concentración máxima).....	102
<b>Tabla 5-4</b> Resultados obtenidos modelo COHERENS Escenario en Condición de frontera crítica (Caudal alto- Concentración mínima) “condición actual”.....	102
<b>Tabla 5-5</b> Resultados obtenidos modelo COHERENS Escenario en Condición de frontera crítica (Caudal alto- Concentración mínima) “escenarios restantes” .....	103
<b>Tabla 5-6</b> Valores promedio de carga a la entrada del embalse (Ton/día) .....	111
<b>Tabla 5-7</b> Resultados obtenidos modelo MOHID Condición de frontera crítica (Caudales altos - Concentraciones mínimas) .....	113
<b>Tabla 5-8</b> Resultados obtenidos modelo MOHID Condición de frontera crítica (Caudal bajo – Concentración máxima) “condición actual” .....	114
<b>Tabla 5-9</b> Resultados obtenidos modelo MOHID Condición de frontera crítica (Caudal bajo – Concentración máxima) “escenarios restantes” .....	115
<b>Tabla 5-10</b> Concentraciones estándar para coliformes totales y fecales [Chapra, 1997] .....	115
<b>Tabla 5-11</b> Concentraciones de sólidos suspendidos totales encontrados en aguas naturales y aguas residuales [Chapra, 1997] .....	116



# **1.Introducción**

## **1.1 Generalidades**

El embalse del Muña fue construido en la década de los años 40's con el objetivo principal de generación de energía eléctrica y almacenamiento de agua en épocas de sequía. Este se encuentra ubicado en el municipio de Sibaté (Cundinamarca), tiene una extensión de 950 ha, sus afluentes son los ríos Muña y Aguas Claras al sur y el río Bogotá al norte cuyas aguas llegan por bombeo desde las compuertas de Alicachín, sitio donde el río ya ha recibido todas las aguas residuales generadas en la capital y demás poblaciones ubicadas aguas arriba. En un principio Sibaté se vió beneficiado debido al incremento en el turismo que atrajo el embalse ya que se practicaban deportes náuticos y otras actividades de recreación. Con el tiempo se generó un problema debido a las altas cargas de materia orgánica, nutrientes, patógenos y sustancias tóxicas del agua del río Bogotá bombeada al embalse. Estos problemas de contaminación del Muña han sido estudiados en diferentes oportunidades y desde hace ya varios años por entidades como la Universidad de los Andes, la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) y EMGESA S.A. E.S.P., entre otras. Conjuntamente el embalse es operado por EMGESA que cuenta con dos cadenas para la generación energética nacional, estas son PAGUA (Paraíso - Guaca) y CASALACO (Canoas – Salto I y II – Laguneta - Colegio), la primera genera 600 MW y la segunda genera 617.2 MW. Por lo tanto es de gran importancia ya que si no se hace se presentarían problemas de generación de energía eléctrica en la capital y poblaciones aguas abajo [UNIANDES, 1999].

## **1.2 Definición del Problema**

Los principales problemas que generan la contaminación del embalse sobre el municipio de Sibaté son los malos olores en la zona; la contaminación tanto de los ríos Aguas Claras y Muña; una mayor frecuencia de enfermedades en la población y los mayores costos para EMGESA, pues las características corrosivas del agua que se está

bombeando generan sobrecostos en la operación y mantenimiento de los equipos, así como pérdidas por el incremento de las afecciones de salud de los trabajadores [Díaz, 2004].

Uno de los problemas ambientales más notorios en el año 2005 asociado al embalse fue el buchón (*Eichhornia crassipes*), el cual se relaciona como hábitat ideal para los zancudos porque les proporciona refugio y reposo propicios para su ciclo reproductivo [EMGESA, *et al.*, 2005]. En el año 2006 este fue removido en casi su totalidad (98%) aplicando herbicidas. El problema está en la materia vegetal derivada del buchón que se encuentra en el fondo del embalse consumiendo oxígeno disuelto en el proceso de descomposición, lo que representaría un problema a largo plazo. Este parámetro se conoce como demanda béntica de sedimentos (SOD, por sus siglas en inglés), y juega un papel muy importante cuando se realiza un balance de oxígeno disuelto en una corriente [Caldwell Doyle, 1994] ya que puede representar una pérdida importante de oxígeno disuelto. La cantidad de oxígeno disuelto (OD) en una corriente o cuerpo de agua es uno de los mejores indicadores de la calidad de esta, y sus altos niveles son condiciones para la existencia de la vida y la generación de procesos de auto purificación o asimilación de carga contaminante. Un nivel más alto de oxígeno disuelto indica agua de mejor calidad. Si los niveles de oxígeno disuelto son demasiado bajos, algunos peces y otros organismos no pueden vivir [Magaud *et al.*, 1997].

### 1.3 Antecedentes

Es importante revisar todo el trabajo previo realizado con relación al impacto ambiental asociado al bombeo del agua del Río Bogotá al embalse del Muña, el cual ha sido desarrollado a través de diferentes proyectos. A continuación se realiza una descripción general de los resultados arrojados por los estudios más importantes efectuados hasta ahora.

En la tesis de grado de la Maestría en Ingeniería Civil de Helena Marcela Díaz, se realizó un trabajo similar al propuesto con el modelo ANUBIS desarrollado por la Universidad de los Andes, establecido en el modelo hidrodinámico desarrollado en lenguaje Pascal por Camacho en el proyecto CIFI - Colciencias (1990), por Camacho (1991) y Lozano (2003), quien adaptó el código al lenguaje Fortran y adicionó al modelo matemático la simulación

del oxígeno disuelto, la demanda bioquímica de oxígeno y el ciclo del nitrógeno. La simulación hidrodinámica del modelo se basó en el programa bidimensional TIDEHYD [Camacho 1991].

En el estudio realizado “saneamiento ambiental del embalse del Muña” se concluyó que hay hipereutrofia en el embalse, esto significa que aunque se situaran nuevas plantas de tratamiento de aguas residuales antes del embalse no habrá una reducción considerable en el fósforo (nutriente limitante) en términos de reducción trófica, es decir el crecimiento del buchón se mantendría. Igualmente se concluyó que en los sedimentos en el embalse del Muña se encuentra un gran depósito de materia orgánica, nutrientes y metales pesados, lo que tendrá alcances importantes a futuro. En cuanto al buchón hubo varias apreciaciones, una de ellas fue que con presencia de buchón o sin ella, se podría aminorar el problema de olores, también necesario tener un control de cosecha del buchón y procesarlo en forma de compostaje.

Ligado al estudio anterior “Impacto ambiental de la suspensión del bombeo del agua del río Bogotá al embalse del Muña [UNIANDES – EMGESA, 1999]” se mostró el impacto que tiene en la salud pública la liberación de gases a la atmosfera. Además, la gran cantidad de compuestos orgánicos malolientes contenidos en el río Bogotá y que el no bombeo al embalse no tendría un cambio significativo en la calidad del agua entre Alicachín y la descarga de la cadena Paraíso – Guaca, más bien los metales pesados retenidos en el embalse seguirían el cauce principal del río y eventualmente al río Magdalena.

En el planteamiento de alternativas para el mejoramiento de la calidad ambiental del embalse del Muña de la mesa de expertos de 2003 se plantearon alternativas que logran minimizar los problemas generados en el embalse. En forma general se propone una remoción mecánica del buchón pero no definitiva (control de cosecha), la construcción de un dique direccional (presente actualmente en forma parcial en el embalse), con el fin de mejorar la hidrodinámica y la continuidad de estudios y modelos tridimensionales con el fin de tener un mejor criterio para la toma de decisiones.

En el 2005 “Definición y valorización técnica de alternativas de sectorización, operación y manejo y modelación hidrodinámica y de calidad del agua del embalse del Muña y segunda mesa de expertos [UNIANDES, 2005]” se recomendó la remoción total del buchón, y continuar rápidamente en la tercera fase de estudios con la aplicación de la implementación y aplicación de modelos hidrodinámicos tridimensionales. No se recomendó la aireación artificial debido a que el mayor hábitat para la oviposición del

zancudo se habrá reducido significativamente mediante el retiro de las macrófitas acuáticas y sería innecesaria, aunque no habría un modelo que permitiera predecir la población de zancudos.

En el estudio realizado “Definición y valoración técnica de alternativas de sectorización, operación y manejo y modelación hidrodinámica y de calidad del agua del embalse del Muña fase III” realizado por Emgesa, Empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá, Empresa de Energía de Bogotá y UNIANDES (2006), se recomendó no considerar el buchón de agua como desecho peligroso, se realizó la modelación hidrodinámica tridimensional del Muña; se desarrollo un modelo de olores para las condiciones del embalse; se realizaron ensayos experimentales cuyo objetivo fue evaluar el efecto de las olas [intensidad y frecuencia] sobre el proceso de oviposición por parte de las hembras del *Culex Quinquefasciatus*, como alternativa tecnológica para el control del mosquito en el embalse del Muña y sus alrededores; y finalmente se presentaron los resultados de un estudio limnológico realizado sobre micro y macroorganismos presentes en el embalse.

El 17 abril de 2006 en Bogotá, las autoridades ambientales otorgaron los permisos y las autorizaciones respectivas para iniciar el retiro del buchón (maleza acuática) en el Muña. Con base en informes de la Secretaría de Salud de Cundinamarca que mostraron mediante pruebas piloto de fumigación que no se presentó afectación al ambiente y por ende a la salud de las comunidades cercanas al embalse”. En el proceso que se llevó a cabo EMGESA, la Empresa de Energía de Bogotá y el Acueducto de Bogotá, contrataron una Mesa de Expertos internacionales que concluyeron que la mejor alternativa para retirar la totalidad del buchón era el uso de herbicidas. Con base en la recomendación se hizo la selección del herbicida (Anikilamina 4 SL) y se le informó a la comunidad de Sibaté sobre la realización de una prueba piloto de uso del herbicida en una parte del Muña. Los resultados de la prueba piloto fueron satisfactorios y se procedió a informarlo a la comunidad de Sibaté al tiempo que se indicó que ya se contaba con los permisos y las autorizaciones para iniciar la aplicación sobre toda la zona afectada por buchón. EMGESA, la Empresa de Energía de Bogotá y el Acueducto de Bogotá importaron la tecnología necesaria para la aplicación del herbicida y para su control posterior. Como parte del proceso se realizó un protocolo de aplicación que contó con la aprobación de la CAR, la Secretaría de Salud de Cundinamarca y el Ministerio de Protección Social. La aplicación del herbicida se realizó desde aerodeslizadores (lanchas especiales usadas para esa actividad), casi planta por planta, únicamente durante el día en las horas en que

la velocidad del viento es la menor y en todo caso cuando no se presentó lluvia. Igualmente, las tres compañías realizaron monitoreos constantes de calidad del agua, en las zonas de salida del embalse y aguas abajo, para garantizar un control integral sobre la presencia del herbicida. Con la aplicación del herbicida las compañías buscaron erradicar el buchón y mitigar el impacto de los zancudos en las zonas cercanas al Muña. El resultado de esto fue el retiro del buchón en un (98%) del área total del embalse. Sin embargo, a largo plazo la calidad del agua del embalse dependerá de la recuperación de la calidad del agua del río Bogotá.

Como se puede notar el grado de estudio sobre la problemática en el Muña ha sido alta y por diferentes entidades, las cuales han proporcionado un conocimiento valioso el cual ha sido tenido en cuenta para lograr una aproximación técnico científica para la solución de la problemática bajo estudio.

## 1.4 Justificación

La presente tesis tiene como fin complementar el estudio hecho en el río Bogotá por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá y la Universidad Nacional de Colombia realizando una nueva modelación hidrodinámica y de calidad de agua con énfasis en la demanda béntica existente en el embalse utilizando los programa COHERENS, MOHID y LAKE2K, utilizados para cuerpos de agua de gran profundidad con el fin de cuantificar y conocer las concentraciones de contaminantes, las características del cuerpo de agua y la calidad del agua a la salida de este, teniendo en cuenta el agotamiento de oxígeno debido a los sedimentos (demanda béntica de oxígeno) existentes en el fondo por la materia vegetal derivada del buchón.

En particular como parte del estudio [UNAL-EAAB, 2011], se considero importante realizar la modelación integrada del sistema Río Bogotá Alicachín – Embalse – Río Bogotá Guaca para determinar la calidad del agua mediante el modelo dinámico desarrollado en la cuenca baja como resultado del bombeo al embalse.

## 1.5 Objetivos

### 1.5.1 General

El presente trabajo tiene como objetivo general, la implementación y comparación con datos secundarios [EMGESA *et al.*, 2006] de dos modelos hidrodinámicos y de calidad del agua en el embalse del Muña y de un modelo agregado simplificado para la simulación de la calidad del agua en lagos, con el fin de evaluar la capacidad de asimilación de carga contaminante bajo distintos escenarios de saneamiento de las aguas del río Bogotá, además de la estimación del valor de la demanda béntica presente en el embalse debida a la existencia de sedimentos orgánicos y plantas acuáticas en el fondo del embalse.

### 1.5.2 Específicos

Los objetivos específicos de la tesis son:

- Analizar y cuantificar la información hidrodinámica y de calidad de agua secundaria disponible para la modelación en el embalse del Muña.
- Implementar los modelos computacionales COHERENS, MOHID y LAKE2K al embalse del Muña teniendo en cuenta el análisis de los datos anteriormente mencionados.
- Estimar los valores de demanda béntica de oxígeno ejercida por los sedimentos existentes en el embalse utilizando los modelos MOHID y LAKE2K.
- Evaluar la capacidad de asimilación de carga contaminante en el embalse del Muña bajo diferentes escenarios de simulación del saneamiento del río Bogotá.
- Identificar el comportamiento hidrodinámico del Muña en términos de patrones de flujo bajo diferentes escenarios de operación.
- Comparar y analizar los resultados obtenidos en los modelos COHERENS y MOHID, con el fin de sugerir el nivel de tratamiento requerido de las aguas residuales de la ciudad de Bogotá teniendo en cuenta los escenarios de saneamiento propuestos.

## 1.6 Metodología

La metodología a seguir para el desarrollo de la tesis, consiste en un trabajo de oficina en el cual se implementaron los modelos hidrodinámicos y de calidad del agua COHERENS y MOHID y el modelo LAKE2K en el embalse del Muña. Este último para estimar la demanda béntica existente en el embalse. En este capítulo se describe de manera general la metodología desarrollada en la elaboración del proyecto de tesis.

### 1.6.1 Familiarización con los diferentes proyectos

Dentro del desarrollo de la tesis se hizo una revisión de los proyectos más importantes realizados hasta el momento, con el objetivo de lograr comprender con claridad la evolución de los temas y problemática relacionados con el embalse del Muña.

### 1.6.2 Entendimiento y pruebas a priori de los modelos a implementar

Los modelos a implementar son *COHERENS* (“*A Coupled Hydrodynamical-Ecological Model for Regional and Shelf Seas*”), [Luyten, *et al.*, 1999] *MOHID* (Modelo Hidrodinámico) [MARETEC, 1985] y *LAKE2K* [Chapra *et al.*, 2011]. Con el fin de comprender la correcta actividad a realizar en esta tesis, se hizo lectura de manuales y de informes de los modelos que se van a utilizar.

### 1.6.3 Obtención e implementación de la información

Para la implementación de los modelos, es necesario suministrar información básica de entrada para evaluar la hidrodinámica y la calidad de agua en el embalse (batimetría, campo de viento, variación temporal de caudales de entrada y salida etc.).

La información mencionada anteriormente fue suministrada por el proyecto “*Definición y valorización técnica de alternativas de sectorización, operación y manejo y modelación hidrodinámica y de calidad del agua del embalse del Muña Fase III - Informe Final*” [EMGESA *et al.*, 2006]. Los escenarios modelados y series de tiempo del bombeo fueron suministrados por el proyecto denominado “*Modelación dinámica de la calidad del agua del Río Bogotá*” [UNAL-EAAB 2011] del cual esta tesis hace parte integral.

### 1.6.4 Protocolo de modelación

Un modelo es una herramienta útil de planeamiento, manejo y control de un sistema si es capaz de encapsular las características relevantes de los fenómenos físicos modelados, si ha sido implementado y calibrado, y si es utilizado siguiendo un protocolo riguroso, como el que se muestra en la Figura 1-1 el cual se seguirá en la presente investigación [Camacho, 2001].

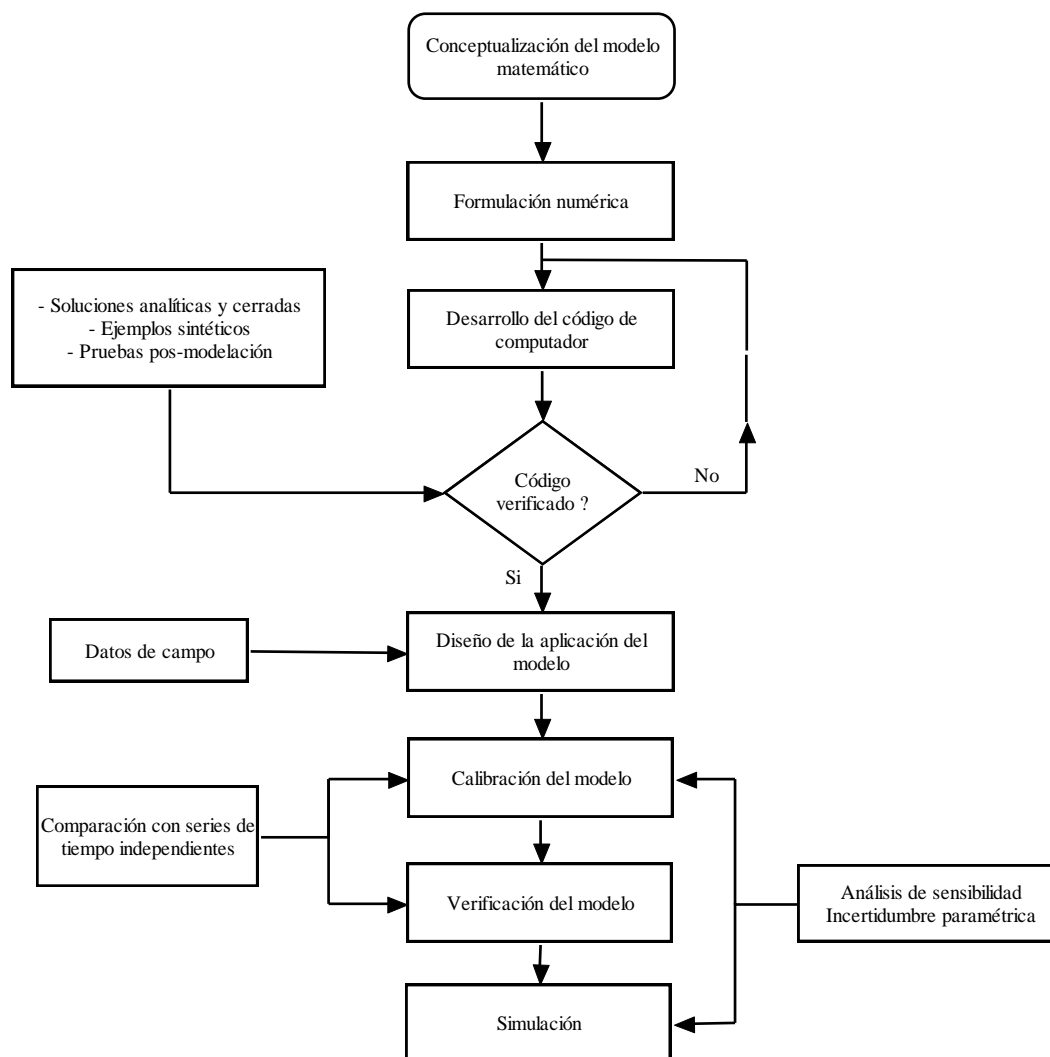


Figura 1-1 Protocolo de modelación [Camacho, 2001]



### 1.6.5 Aplicación de los modelos

Este punto hace referencia a la definición e ingreso de archivos de entrada de la información anteriormente mencionada en el modelo COHERENS. Este programa computacional tiene dos tipos de archivos de manejo de datos de entrada: *param.inc* y *defmod.f*. En el archivo *param.inc* se definen el número de celdas en la dirección X, el número de celdas en la dirección Y, el número de celdas en la dirección vertical Z y el número de fronteras abiertas en las caras “U” y “V”, en el archivo *defmod.f* se definen switches y variables, que le indican al programa qué módulos adicionales ejecutar y además define parámetros de tiempo, contadores, parámetros del archivo, otros parámetros específicos, batimetría, punteros indicadores (fronteras de río), e índices de los puntos de frontera abierta en la grilla (módulo *DEFGRID*). En el módulo *WRFCDAT* se definen los datos meteorológicos (lluvia, evapotranspiración, etc.), para luego especificar en el módulo *WROBDAT* las entradas dependientes del tiempo de las fronteras abiertas [caudal, datos de oleaje, etc.].

El modelo MOHID posee una interfaz gráfica (*MOHID GUI*) para utilizar los ejecutables en el sistema operativo Windows, ya que la interfaz está implementada sobre la plataforma Microsoft .NET. [Barreto *et al.*, 2009]. El ingreso de los datos se hace mediante archivos de texto planos por módulos los cuales manejan una instancia independiente de datos de entrada, ya que todos los módulos tienen que leer un archivo de datos específicos.

LAKE2K (o L2K) es un modelo que está diseñado para calcular las tendencias estacionales de la calidad del agua en los lagos y/o embalses estratificados. L2K se lleva a cabo en el entorno de Microsoft Windows. Está programado en el idioma de Windows macro: Visual Basic para Aplicaciones (VBA). Excel se usa como interfaz gráfica de usuario. Se utilizan hojas de cálculo para introducir los parámetros del modelo y los datos de la morfometría del lago o embalse y de cantidad y calidad de agua de los efluentes lagos. Los resultados del modelo se muestran en las hojas de cálculo y como serie de gráficos de Excel [Chapra *et al.*, 2011].

### 1.6.6 Análisis de resultados, conclusiones y recomendaciones

Como resultado de las actividades realizadas al término de esta investigación se obtuvieron los principales resultados hidrodinámicos y de calidad de agua de los modelos

MOHID y COHERENS en el embalse, los cuales se analizaron y compararon entre sí y los valores de demanda béntica estimados con el modelo L2K.

Además, se resumen las contribuciones y recomendaciones para futuras investigaciones.

## **1.7 Resultados principales**

El aporte principal de esta tesis de investigación además de la estimación del valor de la demanda béntica, es el acople del embalse del Muña en el proyecto desarrollado por parte Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá y la Universidad Nacional de Colombia, para la modelación dinámica de la calidad del agua del Río Bogotá [UNAL-EAAB, 2011].

De manera particular, los resultados obtenidos de la hidrodinámica en el embalse señalaron que la dirección del viento afecta la distribución espacial de la concentración de los determinantes de calidad del agua en el Muña. Además se observa una mayor velocidad en las zonas de bombeo y turbinación. En cuanto a los valores se presenta un mayor el valor de la magnitud de la velocidad en el modelo MOHID que en COHERENS, no obstante, el comportamiento es el mismo a través del tiempo en la zona de descarga del embalse.

En cuanto a los resultados de calidad de agua se logra evidenciar la capacidad de asimilación de una fracción de carga contaminante del embalse para todos los 10 escenarios de modelación tomados del proyecto del río Bogotá [UNAL-EAAB, 2011] en condiciones críticas. También se logra evidenciar que existe un consumo de oxígeno debido a los sedimentos, pero dado que el embalse se encuentra en condiciones anaerobias estos valores son muy cercanos a cero.

## **1.8 Resumen del contenido**

En el Capítulo 2, se muestra una extensa revisión de modelos hidrodinámicos y de calidad de agua COHERENS y MOHID con el propósito de comprender la teoría en la que se basan los programas computacionales utilizados. Además se presentan un estudio general de la demanda béntica de oxígeno, observaciones generales y

características principales del modelo LAKE2K utilizado para estimar la (SOD) en el embalse.

Una vez expuestos los modelos utilizados en la investigación, en el Capítulo 3 se presenta una descripción del montaje realizado del embalse. En particular se menciona la información necesaria básica de entrada a los modelos tal como la batimetría, los campos de vientos y variación temporal de los caudales de entrada y salida.

En el capítulo 4 se presenta un análisis del valor estimado de la demanda béntica de oxígeno presente en el Muña. Se utilizó el modelo MOHID, que cuenta con un módulo (*Benthos*) que tiene en cuenta el agotamiento de oxígeno debido a los sedimentos por medio de la entrada. Así mismo el modelo LAKE2K calcula de forma endógena internamente la demanda béntica y muestra gráficamente el valor de un cuerpo de agua léntico, además de la estratificación de embalse.

Posteriormente al montaje de los modelos y al análisis de la demanda béntica, en el capítulo 5 se presenta un análisis de los principales resultados hidrodinámicos y del calidad de agua obtenidos de la simulación de escenarios realizada en el embalse para los dos modelos.

Finalmente, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones y recomendaciones de la investigación desarrollada.



## **2.Revisión de modelos hidrodinámicos y de calidad de agua, y definición de la demanda béntica de oxígeno**

### **2.1 Introducción**

Durante las últimas décadas, diferentes modelos hidrodinámicos tridimensionales se han desarrollado en varios Institutos y Universidades como la Universidad de Princeton [Blumberg y Mellor, 1987]. En su gran mayoría éstos se generaron para regiones costeras como consecuencia, entre otros, de derrames importantes de crudo en costas y estuarios. Más recientemente, algunos de los modelos hidrodinámicos existentes han sido acoplados con módulos biológicos y/o con módulos de transporte de contaminantes y sedimentos. Por lo general las ecuaciones gobernantes y los esquemas de solución numérica han permanecido aproximadamente iguales [p.e. las ecuaciones de Navier-Stokes y la técnica de separación], pero la parametrización de algunos procesos [p.e. turbulencia, ondas superficiales, interacciones biológicas, etc.] se ha mejorado con el tiempo, lo cual se traduce en programas de computador más eficientes [EMGESA *et al.*, 2006].

La modelación hidrodinámica constituye una herramienta útil para la cuantificación del comportamiento de diferentes cuerpos de agua, permitiendo establecer la variación espacio temporal de velocidades y profundidades bajo diferentes condiciones internas y externas actuantes. En la medida en que un modelo hidrodinámico esté acoplado con un modelo biológico y de calidad de agua puede complementar el comportamiento del cuerpo de agua identificando la variabilidad espacial y temporal de determinantes y constituyentes de interés. Al final, los modelos hidrodinámicos acoplados a modelos biológicos, de calidad de agua y de transporte de sedimentos y contaminantes contribuyen a analizar y comparar de manera relativa diferentes escenarios de manejo potencialmente aplicables a diferentes hidrosistemas complejos [EMGESA *et al.*, 2006].

En este capítulo se presenta la revisión de los modelos hidrodinámicos y de calidad de agua MOHID [MARETEC, 1985], COHERENS [Luyten, *et al.*, 1999] mostrando las características principales de cada uno considerando que las ecuaciones básicas del componente hidrodinámico para los dos modelos se describen en el numeral 2.2.3. Además, se hace énfasis en la demanda béntica indicando algunas observaciones generales y las características principales del modelo LAKE2K [Chapra *et al.*, 2011] utilizado para medir la (SOD) en el Embalse.

Cabe destacar que para el caso particular de esta tesis se tuvo en consideración la modelación con el programa EFDC (Environmental Fluid Dynamics Code) [Hamrick, 1992], sin embargo, se eligieron únicamente los modelos COHERENS y MOHID dada su robustez, ya que una limitación del modelo EFDC está asociada con el número máximo de celdas en la malla a implementar siendo restringida a 100m x 100m para el módulo de calidad de agua y de 50m x 50m para el módulo hidrodinámico. Por lo anterior no es posible configurar una grilla tan detallada como la empleada en los modelos COHERENS y MOHID de 20m x 20m.

## 2.2 Modelo COHERENS

COHERENS es el acrónimo de “A Coupled Hydrodynamical – Ecological Model for Regional and Shelf Seas”. Es un modelo hidrodinámico tridimensional desarrollado por el Programa de Ciencia y Tecnología Marina [MAST] de la Unión Europea [Luyten, *et al.*, 1999] durante el período 1990 – 1998 para entender y analizar los procesos físicos y biológicos relevantes y la influencia de las actividades del hombre en los mares y así predecir el efecto de condiciones cambiantes en la biota y simular el comportamiento de contaminantes. A pesar de que su origen fue fundamentalmente costero, dada su estructura modular y su transparencia, es posible seleccionar los procesos físicos y biológicos más relevantes, al igual que esquemas numéricos específicos y diferentes tipos de procesos externos para una aplicación particular [EMGESA *et al.*, 2006].

El modelo COHERENS puede ser considerado como una herramienta para una mejor comprensión de los procesos físicos y ecológicos y para la predicción, en el control de residuos en los mares de plataforma y las zonas costeras. Es fácil de aplicar en una amplia gama de plataformas informáticas, lo que significa que puede ser atractivo para

los grupos con una experiencia suficiente en la elaboración de modelos. Algunas ventajas importantes del modelo son su transparencia debido a su estructura modular y su flexibilidad debido a la posibilidad de seleccionar diferentes procesos, sistemas o tipos diferentes de forzar condiciones de frontera en una aplicación particular como la de un lago o embalse. Esto permite su uso para estudios de procesos, así como para fines de predicción operativa o sin previo conocimiento de su estructura detallada. La evolución futura se puede implementar sin afectar el núcleo del programa.

### 2.2.1 Descripción del modelo

El programa es escrito en FORTRAN 77 y tiene 4 componentes principales:

- Una parte física con un módulo general para resolver las ecuaciones de advección-difusión.
- Un módulo microbiológico que se ocupa de la dinámica del microplancton, detritus, de nitrógeno orgánico y oxígeno disuelto.
- Un módulo de sedimentos de Euler que se ocupa de la deposición y resuspensión de los inorgánicos, así como de partículas orgánicas.
- Un componente con los modelos de transporte de Euler y Lagrange para la distribución de contaminantes.

El diseño del programa consiste en un “núcleo” y en una serie de módulos. Este diseño modular permite una fácil actualización de cualquier proceso en particular, o la inclusión de un método de solución alternativo, o la adición de nuevos procesos.

### 2.2.2 Características del programa

Las características principales de este modelo son las siguientes:

- Mallas horizontales cartesianas o esféricas
- Malla vertical con coordenadas sigma
- Posibilidad de modelación unidimensional en la vertical
- Un solo  $\Delta t$  para actualizar todas las cantidades tridimensionales
- Diferentes esquemas para advección, momentum y difusión horizontal
- Varias formas de entrada de datos, pudiéndose usar diferentes intervalos de tiempo en las series de entrada

- Las ecuaciones de continuidad y momentum bi o tridimensionales se resuelven con la técnica de separación, similar al modelo de Blumberg y Mellor [1987] de la Universidad de Princeton
- Simulación de temperatura, salinidad o ambas simultáneamente
- Modelación de la absorción de radiación solar en la capa superior de la columna de agua
- Inclusión de efectos de densidad en las ecuaciones de momentum y turbulencia
- Posibilidad de varios esquemas de turbulencia
- Inclusión del efecto de olas y corrientes en el esfuerzo cortante de fondo
- Varias posibilidades de formulación de esfuerzos del viento y flujos de calor
- Representación de la biología de la columna de agua y del ciclo de nutrientes [carbono y nitrógeno] incluyendo la atenuación de luz por material orgánico e inorgánico
- Modelación de la depositación y resuspensión de partículas y de la concentración de partículas inorgánicas en suspensión
- Dos modelos de transporte de contaminantes están disponibles: el primero usa una aproximación euleriana y resuelve ecuaciones del tipo advección-difusión para sustancias disueltas; el segundo es una aproximación lagrangiana.

### 2.2.3 Física del modelo

#### ▪ ECUACIONES BÁSICAS HIDRODINÁMICAS

El programa permite la formulación de las ecuaciones gobernantes, ya sea en coordenadas cartesianas  $(x_1, x_2, x_3)$ , o en coordenadas esféricas  $(\lambda, \phi, x_3)$ , donde el eje  $x_3$  se dirige hacia arriba a lo largo de la vertical. El sistema cartesiano utiliza la aproximación F-plano (frecuencia uniforme de Coriolis) para que los ejes  $(x_1, x_2)$  puedan ser orientados de manera arbitraria en el plano horizontal.

En el sistema esférico  $\lambda$  y  $\phi$  representan, respectivamente, la longitud (positivo en la región oriental, negativa en el hemisferio occidental) y la latitud (positiva en el norte, negativo en el hemisferio sur). La coordenada vertical se elige de forma que la superficie



$x_3 = 0$  corresponde al nivel medio del agua del mar. Las ecuaciones de la superficie libre y de fondo del mar luego toman la forma:

$$x_3 = \zeta(x_1, x_2, t) \text{ o } x_3 = \zeta(\lambda, \phi, t) \quad (1)$$

$$x_3 = -h(x_1, x_2) \text{ o } x_3 = -h(\lambda, \phi) \quad (2)$$

donde  $\zeta$  es la elevación de la superficie del mar y  $h$  la profundidad media del agua de modo que la profundidad total del agua  $H$  está dado por  $H = h + \zeta$ .

El componente hidrodinámico del modelo usa las siguientes ecuaciones básicas: Ecuaciones de momentum usando la aproximación de Boussinesq la cual indica que las variaciones en la densidad  $\rho$  son insignificantes excepto en el término de la fuerza externa (debida a la gravedad y llamada comúnmente fuerza de flotación) donde la variación inducida por la temperatura da origen a la fuerza  $F = \rho g$  y la suposición de equilibrio vertical hidrostático, Ecuación de continuidad y Ecuaciones de temperatura y salinidad.

Las ecuaciones de momentum y continuidad se resuelven numéricamente. El sistema anterior de tres ecuaciones de dimensiones necesita complementarse con un conjunto adicional de dos dimensiones que consiste en la profundidad de las formas de integración horizontal y el impulso de las ecuaciones de continuidad. El conjunto de ecuaciones en coordenadas cartesianas se describen a continuación ya que son las implementadas en el programa por defecto.

A continuación se muestran las ecuaciones gobernantes simultáneas de flujo, salinidad y temperatura del modelo tridimensional hidrodinámico COHERENS

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x_1} + v \frac{\partial u}{\partial x_2} + w \frac{\partial u}{\partial x_3} - fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_3} \left( \nu_T \frac{\partial u}{\partial x_3} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \tau_{11} + \frac{\partial}{\partial x_1} \tau_{21} \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x_1} + v \frac{\partial v}{\partial x_2} + w \frac{\partial v}{\partial x_3} - fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x_2} + \frac{\partial}{\partial x_3} \left( \nu_T \frac{\partial v}{\partial x_3} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \tau_{12} + \frac{\partial}{\partial x_1} \tau_{22} \quad (4)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x_3} = -\rho g \quad (5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x_1} + \frac{\partial v}{\partial x_2} + \frac{\partial w}{\partial x_3} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x_1} + v \frac{\partial T}{\partial x_2} + w \frac{\partial T}{\partial x_3} = -\frac{1}{\rho_0 c_p} \frac{\partial I}{\partial x_3} + \frac{\partial}{\partial x_3} \left( \lambda_T \frac{\partial T}{\partial x_3} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \left( \lambda_H \frac{\partial T}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left( \lambda_H \frac{\partial T}{\partial x_2} \right) \quad (7)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x_1} + v \frac{\partial S}{\partial x_2} + w \frac{\partial S}{\partial x_3} = \frac{\partial}{\partial x_3} \left( \lambda_T \frac{\partial S}{\partial x_3} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \left( \lambda_H \frac{\partial S}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left( \lambda_H \frac{\partial S}{\partial x_2} \right) \quad (8)$$

donde  $[u, v, w]$  son los componentes de la velocidad de flujo,  $T$  es la temperatura,  $S$  es la salinidad,  $f$  es la frecuencia de Coriolis,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $p$  es la presión,  $\nu_T$  y  $\lambda_T$  son los coeficientes turbulentos verticales de viscosidad y de difusión,  $\lambda_H$  es el coeficiente de difusión horizontal para salinidad y temperatura,  $\rho$  es la densidad,  $\rho_0$  la densidad de referencia,  $c_p$  es el calor específico del agua a presión constante e  $I[x_1, x_2, x_3, t]$  es la radiación solar. Los componentes horizontales del vector de esfuerzos están dados por

$$\tau_{11} = 2\nu_H \frac{\partial u}{\partial x_1} \quad (9)$$

$$\tau_{21} = \tau_{12} = \nu_H \left( \frac{\partial u}{\partial x_2} + \frac{\partial v}{\partial x_1} \right) \quad (10)$$

$$\tau_{22} = 2\nu_H \frac{\partial v}{\partial x_2} \quad (11)$$

donde  $\nu_H$  es el coeficiente de difusión horizontal para momentum.

Para la solución de las ecuaciones gobernantes es necesario especificar condiciones de frontera y condiciones iniciales. Las condiciones de frontera en la superficie de agua son para la velocidad superficial usualmente se obtiene mediante la definición de un esfuerzo cortante en función de las componentes de velocidad del viento; para el flujo superficial

de temperatura se expresa en función del flujo de calor vertical descendente y del calor específico  $c_p$ ; para el flujo superficial de salinidad se determina en función de las tasas de evaporación y precipitación y de la salinidad superficial y para la turbulencia superficial en función de la longitud de mezcla y el coeficiente de turbulencia superficial.

Las condiciones de frontera para el fondo son esfuerzo cortante de fondo según ley de fricción lineal o cuadrática; cero flujo de temperatura normal al lecho; cero flujo de salinidad normal al lecho y representación similar a la superficie para la turbulencia. Las condiciones de frontera en los límites del espejo de agua corresponden a flujos advectivos y difusivos iguales a cero.

La forma general de la ecuación de estado de la densidad en función de la salinidad y de la temperatura es:

$$\rho = \rho_0 (1 + \beta_s (S - S_0) - \beta_T (T - T_0)) \quad (12)$$

donde  $\rho$ ,  $S_0$  y  $T_0$  son los valores de referencia de densidad, salinidad y temperatura, y los coeficientes de expansión  $\beta_s$  y  $\beta_T$  son constantes.

En cuanto a la difusión horizontal, el modelo tiene la opción de seleccionar si los coeficientes de difusión horizontal  $\nu_H$  y  $\lambda_H$  son uniformes en el espacio y en el tiempo o varían de acuerdo con la magnitud de la velocidad según la parametrización de Smagorinsky:

$$\nu_H = C_{mo} \Delta x_1 \Delta x_2 D_T \quad (13)$$

$$\lambda_H = C_{so} \Delta x_1 \Delta x_2 D_T \quad (14)$$

donde

$$D_T^2 = \left( \frac{\partial u}{\partial x_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x_2} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial x_2} + \frac{\partial v}{\partial x_1} \right)^2 \quad (15)$$

y  $\Delta x_1$  y  $\Delta x_2$  corresponden al espaciamiento horizontal de la grilla,  $C_{mo}$  y  $C_{so}$  son constantes de difusión y adoptan como valor por defecto 0.1.

## ▪ MÉTODOS NUMÉRICOS

Los métodos numéricos descritos en este capítulo se basan en trabajos previos descritos por Blumberg y Mellor [Blumberg; Mellor, 1987].

Diferencias conservadoras finitas (equivalente a una técnica de volúmenes finitos para la malla cartesiana) se utilizan para discretizar el modelo matemático en el espacio. La grilla elegida para la discretización horizontal es bien conocida como grilla Arakawa "C" que escalona las corrientes y nodos de presión/elevación para dar una buena representación de las ondas de gravedad importantes y ofrece representaciones simples de las fronteras y las zonas costeras.

También se hace el uso común de " $\sigma$ " transformación de coordenadas verticales, por el que diversas superficies y límites inferiores se transforman en superficies constantes. Esto proporciona para la representación exacta de la superficie y los procesos abajo del límite. También da lugar a un número igual de elementos en cada columna vertical de agua.

Las ecuaciones de momento se resuelven con la técnica del modo de división como en el modelo de Blumberg y Mellor [Blumberg; Mellor, 1987]. El método consiste en la solución de las ecuaciones de profundidad- integrada de momento y continuidad para el modo barotrópico con un pequeño paso de tiempo para satisfacer el estricto criterio de estabilidad de CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) para las ondas de gravedad en la superficie, y el momento en 3-D, y las ecuaciones escalares de transporte para el modo "interno" o "baroclínica" con un intervalo de tiempo mayor. Una "predicción" y un paso "corrector" se aplican a las ecuaciones de momento horizontal para satisfacer el requisito básico que las corrientes de profundidad integrada obtenidas a partir de las ecuaciones del modo 2-D y 3-D tengan valores idénticos.

### 2.2.4 Limitaciones del modelo

Antes de entrar a revisar los resultados hay que tener en cuenta primero las limitaciones encontradas para el caso de la modelación realizada en el Embalse.

- Una de las limitaciones del programa COHERENS es que el modelo no incluye un modulo donde se pueda estimar el valor de la demanda béntica de oxígeno.

- La versión presentada del modelo biológico en COHERENS le concierne solo el nitrógeno como potencial nutriente limitante, por esa razón no se puede modelar otros determinantes importantes de calidad de agua.

## 2.3 Modelo MOHID

El modelo MOHID fue desarrollado por investigadores del MARETEC (Centro de Ambiente y Tecnologías Marítimas) [MARETEC, 1985] perteneciente al Instituto Superior Técnico (IST) de la Universidad Técnica de Lisboa. MOHID es un sistema de modelación en tres dimensiones de la dinámica de diversos cuerpos de agua como ríos, estuarios y océanos. El nombre MOHID es un acrónimo de Modelo Hidrodinámico (en portugués Modelo Hidrodinámico) [Barreto *et al.* 2009].

El desarrollo del modelo MOHID comenzó en 1985, y desde ese momento se han realizado numerosas actualizaciones y mejoras, debido a su uso durante los diferentes proyectos de investigación científica y proyectos de ingeniería. En sus comienzos, el modelo permitía realizar simulaciones únicamente en dos dimensiones. Utilizaba el paradigma de diferencias finitas para la discretización del dominio [Barreto *et al.* 2009]. Este modelo fue utilizado para estudiar los estuarios y zonas costeras mediante un enfoque de diferencias finitas.

En los años siguientes, el modelo de transporte bi-dimensional euleriano y lagrangiano se incluyó en este modelo. El primer modelo tridimensional se presentó en el año de 1995 en el trabajo de Santos [Santos, 1995] Esta versión se llamó MOHID 3D y se basó en un modelo de coordenadas verticales llamado doble sigma. Con la intención de generalizar el uso de diferentes sistemas de coordenadas es que en el año 1999 se pasa a trabajar con el paradigma de volúmenes finitos [Barreto *et al.* 2009].

Posteriormente, debido al agregado de mayores funcionalidades y la capacidad de trabajar con modelos en tres dimensiones, se hizo necesario el cambio de paradigma de programación y consecuentemente del lenguaje utilizado. Se migró el código para adaptarse al paradigma orientado a objetos, siendo Fortran 95 el lenguaje elegido para la nueva implementación. Este cambio permitió el diseño basado en clases (si bien este lenguaje no soporta por completo el concepto de clases, esta versión permite aplicar diversos conceptos de este paradigma de programación).

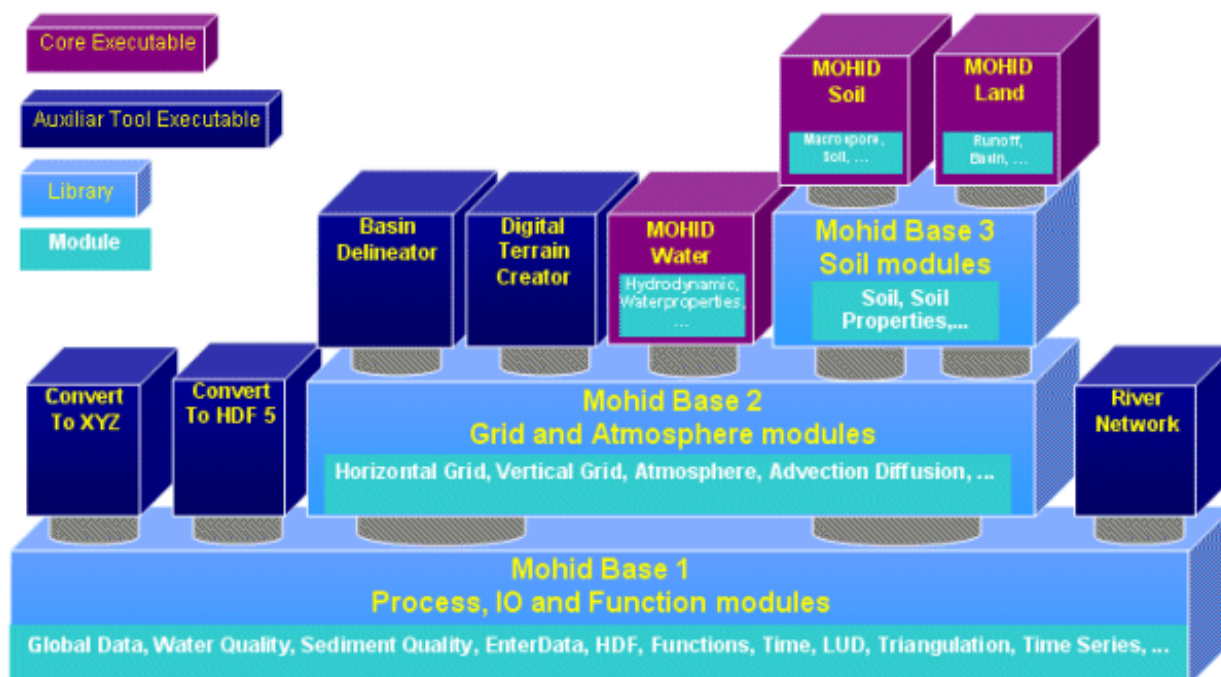
Actualmente, MOHID está integrado por diferentes herramientas como lo son MOHID Water, MOHID Soil y MOHID Land. Estas herramientas pueden ser usadas para estudiar el ciclo del agua en un ambiente integrado, permitiendo simular procesos físicos y biogeoquímicos tanto en el agua como en los sedimentos.

Desde el punto de vista informático se puede catalogar como un sistema de tamaño considerablemente grande. Actualmente MOHID está compuesto por más de 60 módulos que implican más de 300 mil líneas de código [Barreto *et al.* 2009].

### 2.3.1 Descripción de los modelos principales de MOHID

- Herramientas numéricas

Los módulos de MOHID están estructurados según una jerarquía, la cual se presenta en la Figura 2-1.



**Figura 2-1 Estructura jerárquica del marco de MOHID [Barreto *et al.* 2009]**

Los tres archivos principales ejecutables (MOHID Agua, MOHID Suelos y MOHID Tierra) se pueden encontrar en la parte superior de la pirámide. Pequeños programas de utilidad son fácilmente construidos en la cima de las bibliotecas, que generalmente están

diseñados para obtener resultados pre o post-procesamiento de los archivos ejecutables esenciales.

El diseño común de todas las clases MOHID, relacionadas con la encapsulación / métodos públicos no sólo hizo que el código sea más fiable y protegido contra los errores, sino que también condujo a un código muy bien estructurado y fácil de comprender por los nuevos científicos que trabajan con el modelo de caso, tomando en cuenta las más de 300 mil líneas de código que componen el marco de MOHID.

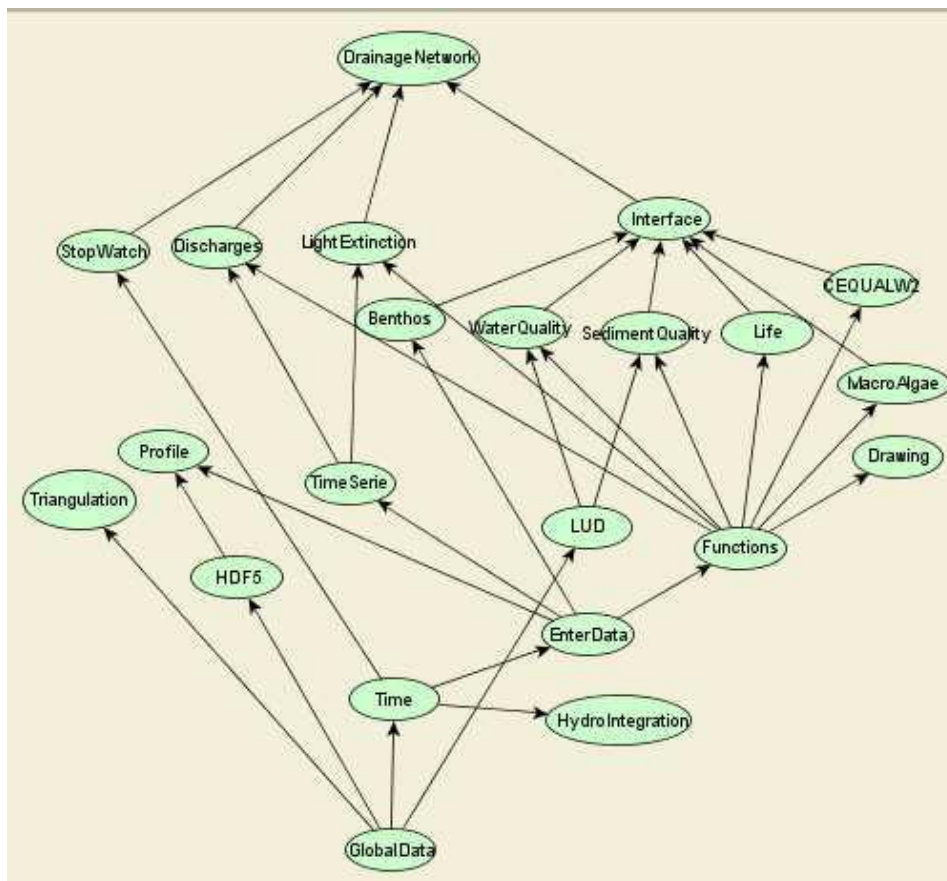
Como se ve en la Figura 2-1, en la base de la arquitectura se encuentran dos bibliotecas de suma importancia, denominadas Mohid Base 1 y Mohid Base 2. Estas bibliotecas resuelven problemas específicos, ya sea, numéricos, procesamiento de datos de entrada y salida, etc.

- Biblioteca Mohid Base 1

La biblioteca Mohid Base 1 se encuentra en la base de la estructura del marco MOHID. La biblioteca agrupa las funciones que realizan el procesamiento de entrada y salida de datos, o sea, lee los archivos que sirven como datos de entrada a la simulación en curso de MOHID y escribe en archivos los resultados (intermedios o finales), para ser analizados una vez finalizada la simulación o para un postprocesamiento de datos por parte de otras herramientas. A su vez, se encarga de realizar funciones de cálculo típicas como puede ser resolver sistemas lineales.

También tiene módulos que se encargan del manejo del tiempo en un formato propio que sirve entre otras cosas para establecer los tiempos de simulación.

En la Figura 2-2 se presentan las relaciones de dependencia que existen entre los distintos módulos pertenecientes a la biblioteca Mohid Base 1.



**Figura 2-2 Relaciones de dependencia entre módulos Mohid Base 1 [Barreto *et al.* 2009].**

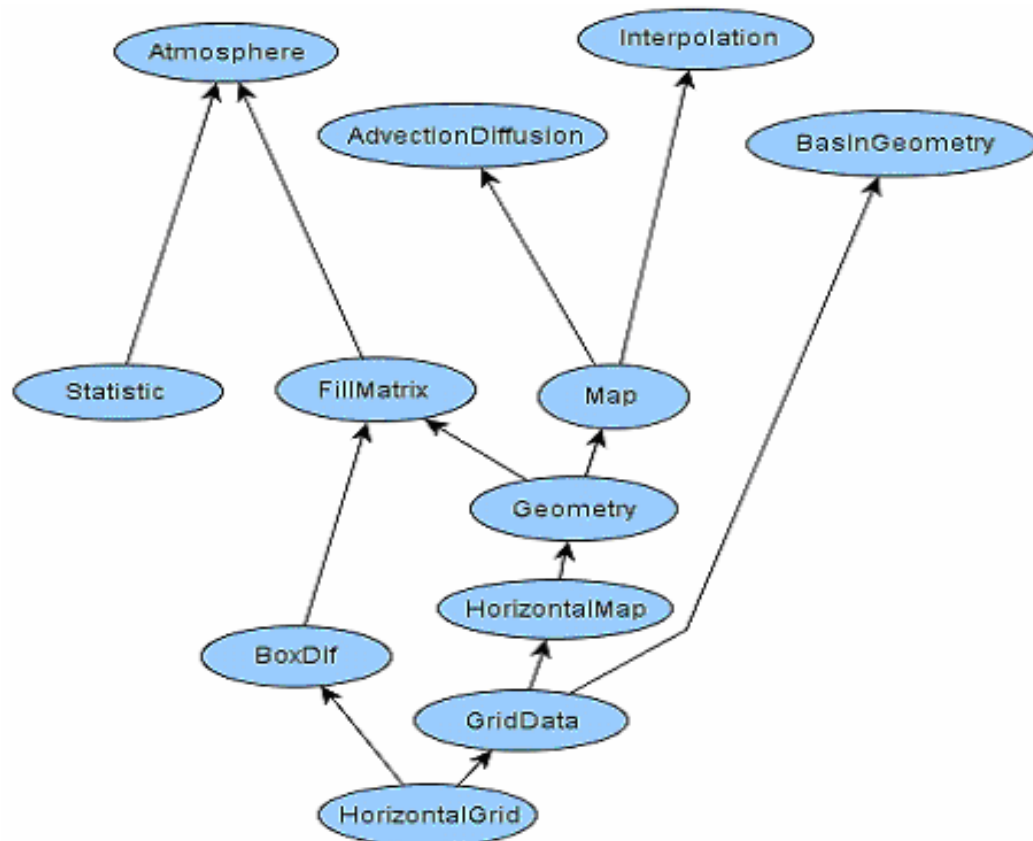
- Biblioteca Mohid Base 2

La biblioteca Mohid Base 2, a diferencia de Mohid Base 1 que utiliza únicamente módulos dentro de la misma biblioteca, utiliza o se basa en módulos existentes en Mohid Base 1 para realizar cálculos más complejos que sirven para otros módulos que se encuentran más arriba en la arquitectura del marco de modelación MOHID.

Entre las funcionalidades más importantes la biblioteca Mohid Base 2 posee módulos que modelan la discretización del dominio en grillas, módulos para mejorar la interacción del cuerpo de agua con la atmósfera, y módulos que realizan cálculos para las propiedades biogeoquímicas.

En la Figura 2-3 se muestra los módulos presentes en la biblioteca Mohid Base 2 y sus relaciones de dependencia dentro de la misma.





**Figura 2-3 Dependencias entre módulos de la biblioteca Mohid Base 2 [Barreto *et al.* 2009].**

- Intercambio de datos y almacenamiento

MOHID usa 2 componentes o módulos para intercambiar información entre el modelo y la interfaz gráfica (GUI).

- Módulo de EnterData:

Permite leer y escribir archivos de datos ASCII, estructurados en forma similar a un archivo en formato XML. La razón por la cual no se optó por leer y escribir con el formato XML es porque se implementó tiempo antes de que este formato se popularizara. Durante la simulación, casi todos los módulos que manejan información del proceso crean una instancia en particular del módulo EnterData, para leer datos de diferentes archivos.

- Módulo de HDF:

El formato HDF es usado por MOHID para almacenar los resultados intermedios o finales producidos por el modelo.

Algunas de las ventajas del formato HDF5, con respecto a otros formatos, son que los archivos pueden almacenar mucha más información, el acceso al archivo es más rápido y los archivos pueden ser leídos incluso si la ejecución no llegó a su fin.

- Interfaz de Usuario

A medida que las herramientas numéricas se hacen más complejos, se desarrolla la necesidad de una interfaz gráfica de usuario bien estructurada. Con el desarrollo del marco MOHID se construyó una interfaz gráfica de usuario, lo que permite la visualización de los datos de entrada del modelo, la ejecución del programa y el análisis de la producción de resultados.

La interfaz gráfica del usuario MOHID está compuesta por dos programas escritos principalmente en VB.NET utilizando las características de programación orientadas a objetos:

- MOHID GUI, que se ocupa de la estructura de directorios y archivos de datos necesarios para establecer un conjunto de simulaciones MOHID, y maneja los datos de salida de los archivos usados y generados por MOHID. También sirve como el recurso principal que une todo el software MOHID.
- MOHID SIG, que es una herramienta que gestiona los datos geo-referenciados y también de forma visual los resultados producidos por MOHID. Ambas interfaces incorporan otras herramientas auxiliares, de post-procesamiento para el manejo de los datos de salida (o entrada) de MOHID, como lo son:
- Mohid PostProcessor: es una interfaz gráfica que despliega en pantalla, en forma de animación, datos almacenados en el formato HDF.
- ConvertToHDF5: es una herramienta que permite la aplicación de diferentes operaciones, que se conocen como acciones, que involucran archivos en el formato HDF5. Estas acciones pueden ser la conversión de datos a HDF5, interpolación de grillas y concatenación de muchos archivos.

- Digital Terrain Creator: es un programa que se utiliza principalmente para la creación de una grilla de datos y para generar el archivo de entrada de batimetría del modelo.
- Basin Delineator: realiza la delimitación de cuencas hidrológicas para utilizar el ejecutable MOHID Land.
- River Network: es un programa numérico que permite simular un sistema de ríos.
- Convert to XYZ: es una pequeña herramienta numérica que extrae datos tridimensionales y los transforma en coordenadas XYZ. Es útil para extraer datos para crear batimetrías.

### 2.3.2 Propiedades principales

Las principales propiedades del marco de MOHID son:

- Posibilidad de ejecutar diferentes aplicaciones al mismo tiempo.
- Adaptabilidad a nuevas áreas de aplicación.
- Utilización del modelo en cualquier dimensión (1D, 2D y 3D).
- Discretización espacial utilizando la técnica de volúmenes finitos (las coordenadas espaciales son independientes, y se puede elegir cualquier geometría para cada dimensión), lo que permite una mayor flexibilidad en la subdivisión del dominio vertical y horizontal.
- Utilización de modelos anidados, con limitación dada por el poder computacional disponible.
- Posibilidad de realización de corridas en paralelo de los diferentes modelos mediante procesadores separados, la comunicación entre sí usando el protocolo MPI (Message Passing Interface), permitiendo así un aumento muy significativo en el tiempo de cálculo.

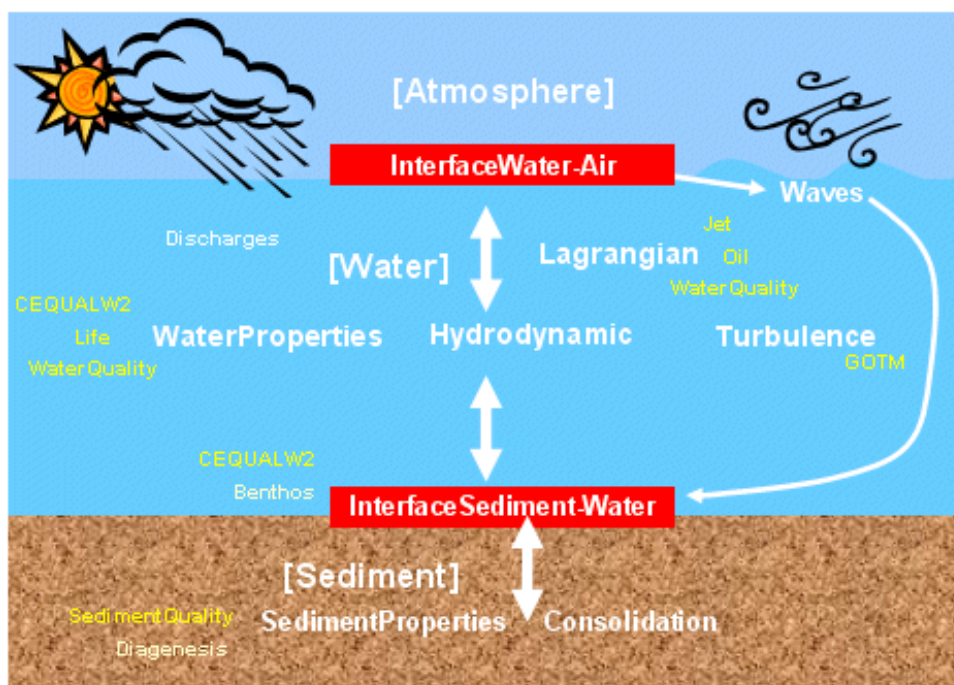
### 2.3.3 MOHID Agua

MOHID Water es un programa numérico en tres dimensiones que simula diversos procesos que ocurren en cuerpos de agua como ríos, embalses, estuarios, áreas costeras u océanos. Es uno de los programas principales dentro del sistema de modelación MOHID. El programa se compone de una serie de módulos que están contruidos sobre las bibliotecas Mohid Base 1 y Mohid Base 2 y que primordialmente se

encargan de calcular los procesos físicos y biogeoquímicos y además se encarga del manejo de la lectura y escritura de los datos requeridos por el modelo.

Este programa numérico fue diseñado para simular sistemas acuáticos considerando además los procesos de intercambio con otros medios, como ser la interacción con la atmósfera y con el fondo.

La Figura 2-4 muestra la interacción entre distintos módulos del sistema, mostrando las relaciones y las interfaces con los diferentes medios [Barreto et al. 2009].



**Figura 2-4 Esquema de MOHID Water: principales módulos involucrados [Barreto et al. 2009].**

- Principales módulos de MOHID Water

La estructura de MOHID se organiza en seis grandes grupos funcionales, cada uno de ellos compuesto por diversos módulos:

- **Módulos de parámetros globales:** se encargan de mantener parámetros globales como el tiempo de simulación, funciones o variables generales.

- **Módulos de funciones independientes:** manejan operaciones específicas que no se pueden representar en otros módulos o que dada la complejidad de lo que resuelve deben estar en un módulo aparte:
- **Módulos estructurales:** son los encargados de la discretización y transformaciones de la geometría del dominio y referencias para moverse en la jerarquía de los dominios. Se nutre de variables como distancias, áreas, volúmenes, etc:
  - HorizontalGrid maneja la discretización horizontal.
  - HorizontalMap realiza un mapeo horizontal de la grilla en 2D.
  - Map realiza el mapeo 3D de las celdas de la grilla.
  - Geometry maneja diferentes formas de discretización vertical.
- **Módulos de manejo de datos:** realizan operaciones de entrada/salida:
  - *EnterData* lee y escribe archivos en formato ASCII, realiza la lectura de los archivos de entrada y genera los archivos de salida de la simulación.
  - *HDF5* lee y escribe los datos de diferentes matrices en formato HDF5.
  - *TimeSeries* lee y escribe archivos con información de la simulación a medida que avanza la ejecución.
- **Módulos de funciones específicas:** implementan operaciones específicas que pueden ser utilizadas solamente por MOHID:
  - BoxDif se encarga principalmente de inicializar las propiedades definiendo cajas. Una caja o box file define un área en 2D o 3D. Estas áreas pueden ser usadas para inicializar diferentes propiedades o integrar valores entre las diferentes cajas, esto se aplica o se puede aplicar para todas las variables modeladas. Otra característica del módulo BoxDif es que integra los valores de las variables que modela en espacio y tiempo dentro de una caja y entre diferentes cajas. Las operaciones que realiza este módulo se pueden aplicar en un dominio de dos o tres dimensiones.
  - Statistics computa operaciones estadísticas básicas (en el espacio y tiempo) y va almacenando resultados de interés durante la simulación.

- Interfaz transfiere información (condiciones de fuerza y variables de estado) entre las estructuras de grillas de una, dos y tres dimensiones hacia arreglos unidimensionales y para llamar a los procedimientos de los módulos bioquímicos de dimensión cero.
- WaterQuality es un módulo que calcula la dinámica de diversos organismos o microorganismos que viven en cuerpos de agua.

• **Módulos de procesos**, son módulos que corresponden a los diferentes procesos que tienen lugar en los diferentes compartimentos del medio (Figura 2-5). A continuación se presenta una breve descripción de los más principales módulos de MOHID.



**Figura 2-5 Relación de dependencia entre módulos de MOHID Water [Barreto et al. 2009].**

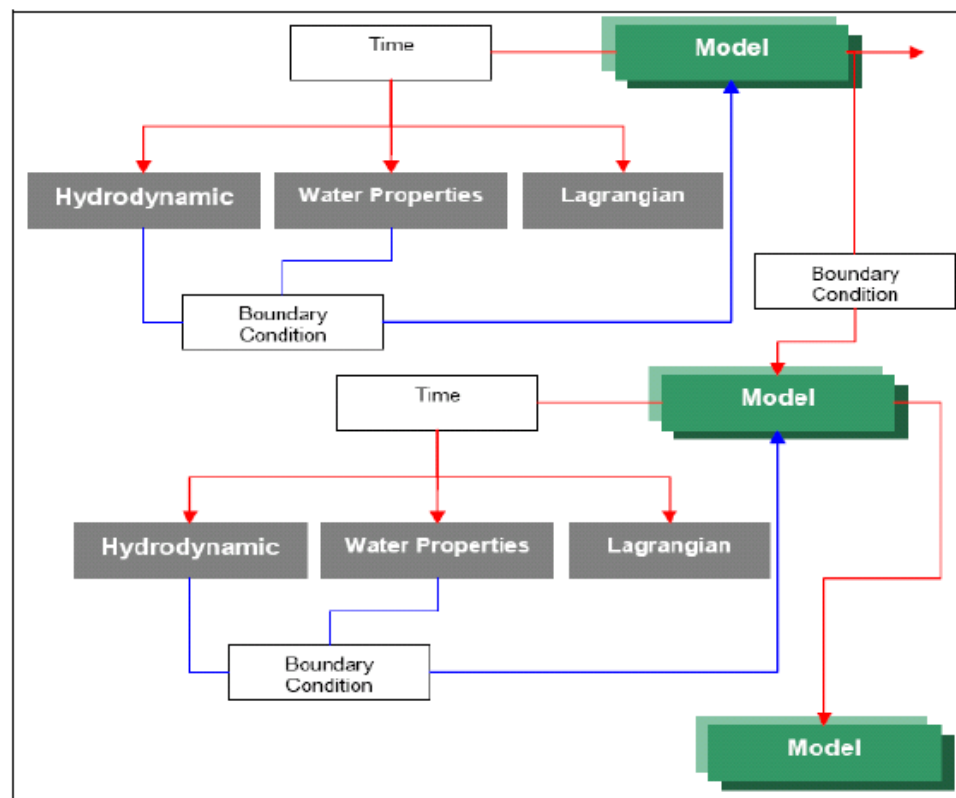
- Model

Es el módulo principal en la arquitectura del sistema. El módulo Model maneja toda la información de un solo modelo. Es responsable de construir, modificar y destruir cada

modelo. También se encarga de controlar el flujo de información entre diferentes modelos y la evolución del tiempo de simulación. Coordina la ejecución del módulo Hydrodynamic y el módulo Transport; y depende de los módulos Hydrodynamic, WaterProperties y Lagrangian.

La coordinación de ejecución del modelo consiste en la actualización del tiempo global del modelo y la actualización de los módulos Transport e Hydrodynamic en un solo modelo.

Cuando se trabaja con modelos encajados las comunicaciones entre modelos se hacen en una sola vía y de forma recursiva, es decir, las condiciones iniciales y otros datos que se calculan durante la simulación se envían desde el padre al hijo (Figura 2-6) [Barreto et al. 2009].



**Figura 2-6 Esquema de coordinación entre módulos de la ejecución [Barreto et al. 2009].**

- Geometry

El módulo Geometry almacena y actualiza la información sobre los volúmenes finitos, calculando las áreas laterales y los volúmenes de la discretización. Para realizar estos cálculos se basa en la elevación de la superficie libre calculada por el módulo hidrodinámico y en los datos batimétricos ingresados.

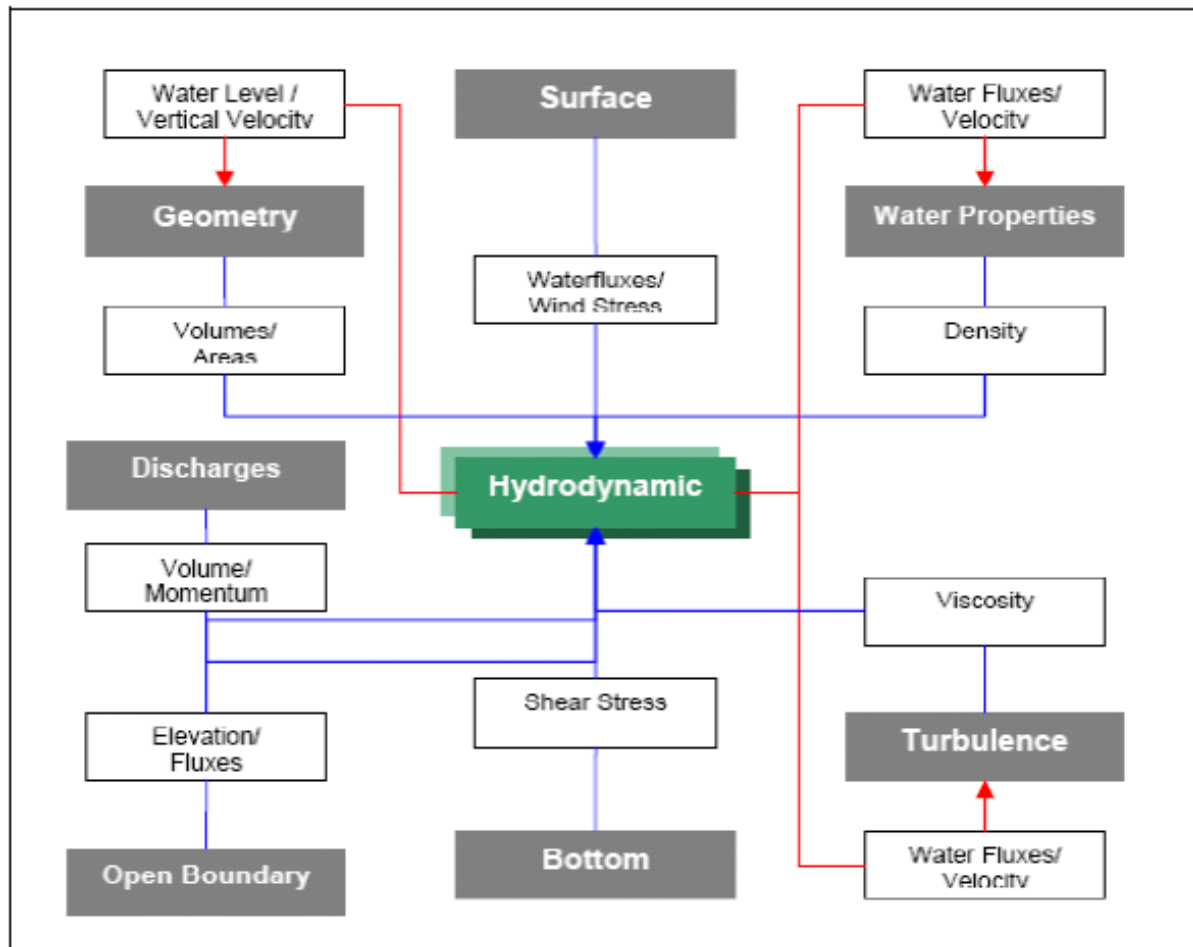
El enfoque de volúmenes finitos usado en MOHID permite que la resolución de las ecuaciones de conservación sea independiente de la geometría de cada celda o volumen de control, debido a que solo se requiere el flujo a través de las caras de la celda. De esta manera se logra una separación total entre las variables físicas y la geometría. Como los volúmenes pueden variar a lo largo de la simulación, la geometría es calculada y/o actualizada en cada paso de simulación después de calcular las variables físicas. Además, las coordenadas espaciales son independientes entre sí y se puede elegir cualquier geometría en cualquier dimensión. En la dirección horizontal se puede usar tanto coordenadas cartesianas como curvilíneas y en la dirección vertical pueden utilizarse coordenadas verticales genéricas con diferentes subdominios. De hecho, el módulo Geometry puede dividir la columna del cuerpo de agua en diferentes tipos de coordenadas como Sigma (coordenadas diseñadas para simular variaciones importantes del fondo dado que siguen la forma del terreno), Cartesianas, Lagrangianas, de Espaciamiento Fijo (Fixed Spacing), Armónicas, etc. [Barreto et al. 2009].

- Hydrodynamic

El módulo Hydrodynamic (Figura 2-7) calcula el nivel, la velocidad y el flujo de agua en cada paso de tiempo. La discretización espacial es realizada mediante una aproximación de volúmenes finitos y la discretización temporal se realiza con un algoritmo semiimplícito ADI (Alternating Direction Implicit) [Barreto et al. 2009].

Este algoritmo computa alternativamente una componente de la velocidad horizontal implícitamente mientras la otra es calculada explícitamente. El sistema de ecuaciones resultantes es tridiagonal y por lo tanto puede ser resuelto de manera eficiente por el algoritmo de Thomas [Barreto et al. 2009].

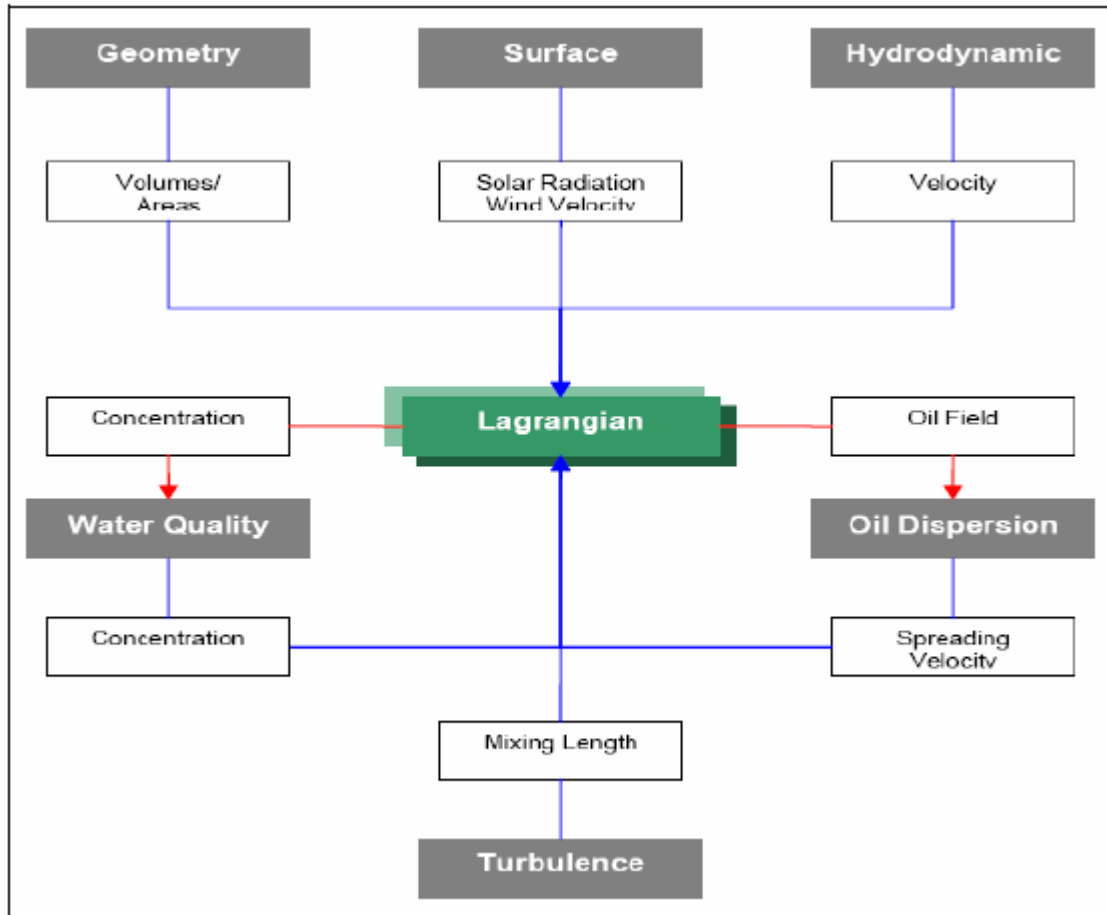




**Figura 2-7 Muestra la dependencia del módulo Hydrodynamic con otros módulos [Barreto *et al.* 2009].**

- Lagrangian

Es un modelo de transporte lagrangiano (gestiona las mismas propiedades que el módulo WaterProperties). Puede ser utilizado, por ejemplo, para la simulación de la dispersión de petróleo u otro contaminante vertido. El módulo lagrangiano del MOHID utiliza el concepto de trazador, cuyas propiedades fundamentales son la posición espacial ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) de las partículas utilizadas como trazadores, su volumen y la concentración de determinadas propiedades de interés, como pueden ser cualquiera de las evaluadas en el módulo de calidad del agua (Figura 2-8).



**Figura 2-8 Muestra la dependencia del módulo Lagrangian con otros módulos [Barreto et al. 2009].**

- Oil

El módulo Oil se encarga específicamente de la simulación del movimiento de derrames de petróleo.

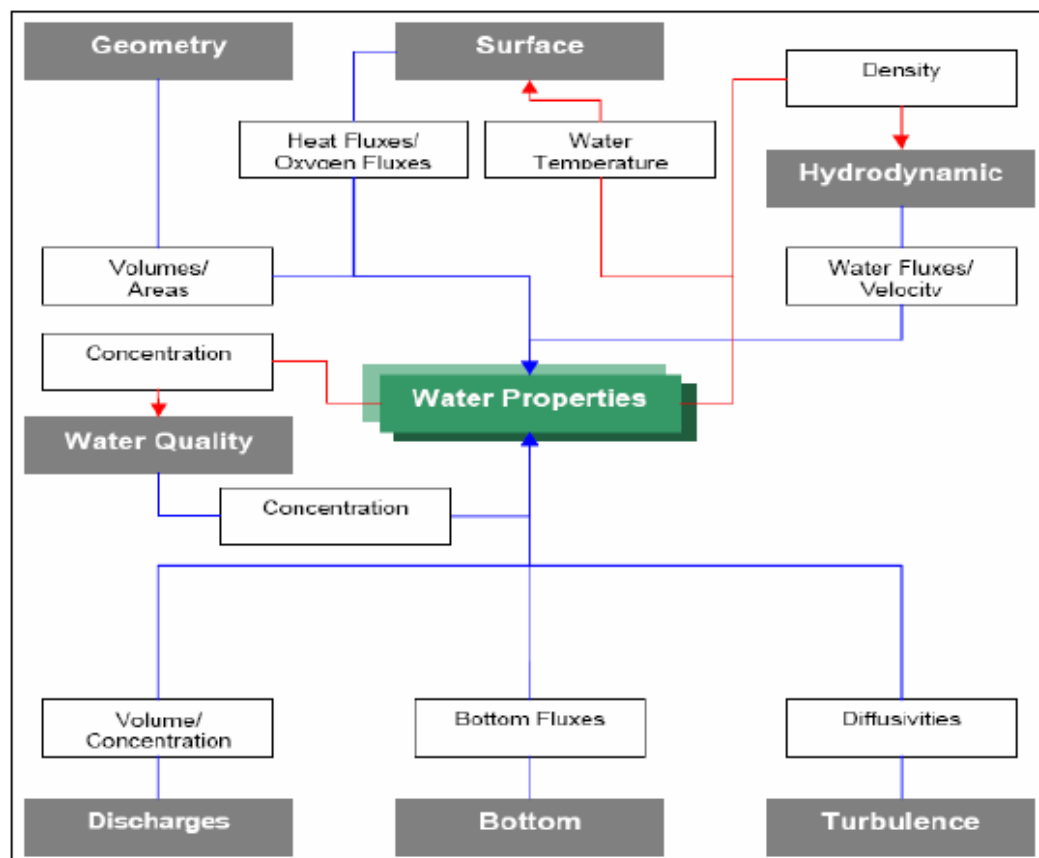
Este tipo de herramienta es importante para el desarrollo de planes de contingencia, permitiendo mitigar alguna catástrofe con este producto en el mar. El módulo también permite la evaluación de algunas características del impacto ambiental asociado al movimiento de petróleo. Por ejemplo, MOHID fue utilizado para calcular el posible impacto y el movimiento de la mancha de petróleo en la catástrofe del buque Prestige en las costas de Galicia en Noviembre de 2002.

El módulo Oil depende de los módulos Surface (presión atmosférica, oleaje, viento), WaterProperties (salinidad, temperatura, sedimentos cohesivos) y Lagrangian.

- WaterProperties

El módulo WaterProperties coordina y maneja la evolución de las propiedades del agua utilizando un modelo Euleriano de transporte. Para llevar a cabo esta tarea, se apoya o usa otros módulos como el de Advection-Difussion, encargado de calcular el transporte (por difusión o advección) de las propiedades, o el módulo WaterQuality (calidad del agua), el cual es uno de los tres módulos encargados de calcular procesos biogeoquímicos.

A través de este módulo, MOHID simula diferentes propiedades como la temperatura, salinidad, sedimentos cohesivos, fitoplancton, nutrientes, contaminantes, etc. (Figura 2-9).

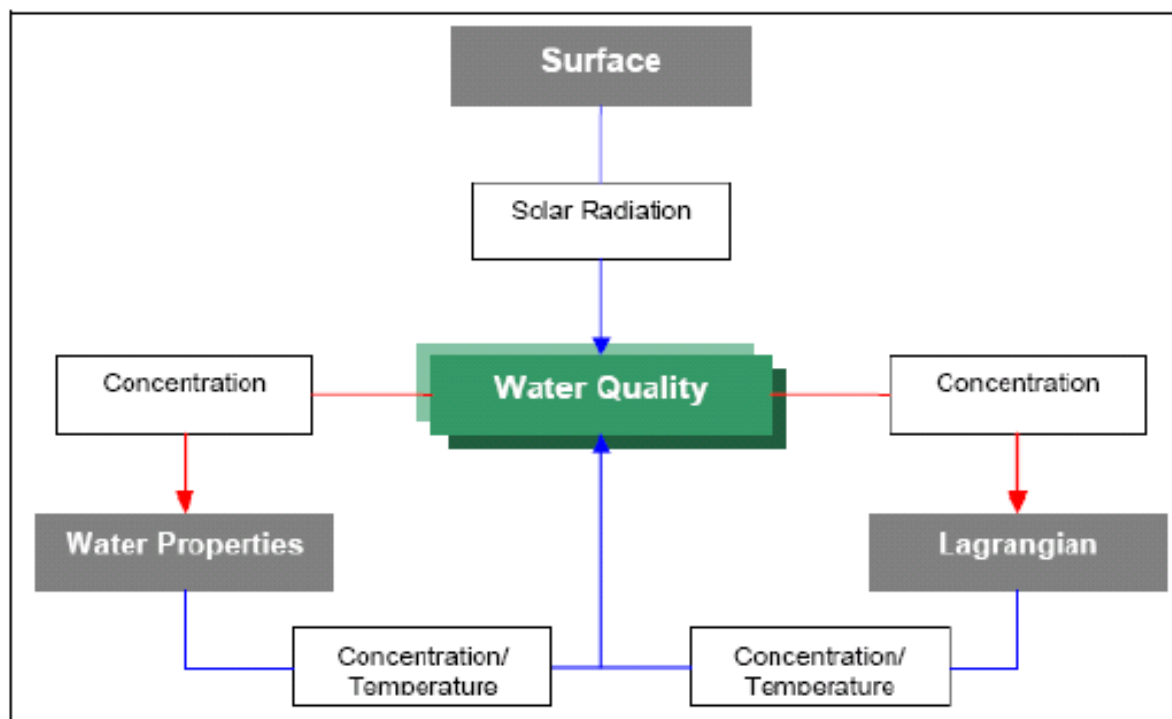


**Figura 2-9 Muestra la dependencia del módulo WaterProperties con otros módulos [Barreto et al. 2009]**

- WaterQuality

El módulo WaterQuality simula la producción primaria y secundaria, y el ciclo de los nutrientes en los ecosistemas acuáticos. Los forzantes principales son la temperatura y la luz.

El módulo fue desarrollado en términos de fuentes y sumideros de ciertas propiedades, o dicho de otra manera, definiendo flujos de entrada y salidas del sistema, lo cual permite un fácil acoplamiento al módulo de transporte en ambas formulaciones, Euleriana y Lagrangiana. Debido a la interdependencia de las propiedades, se calcula un sistema lineal de ecuaciones para cada volumen de control (Figura 2-10).

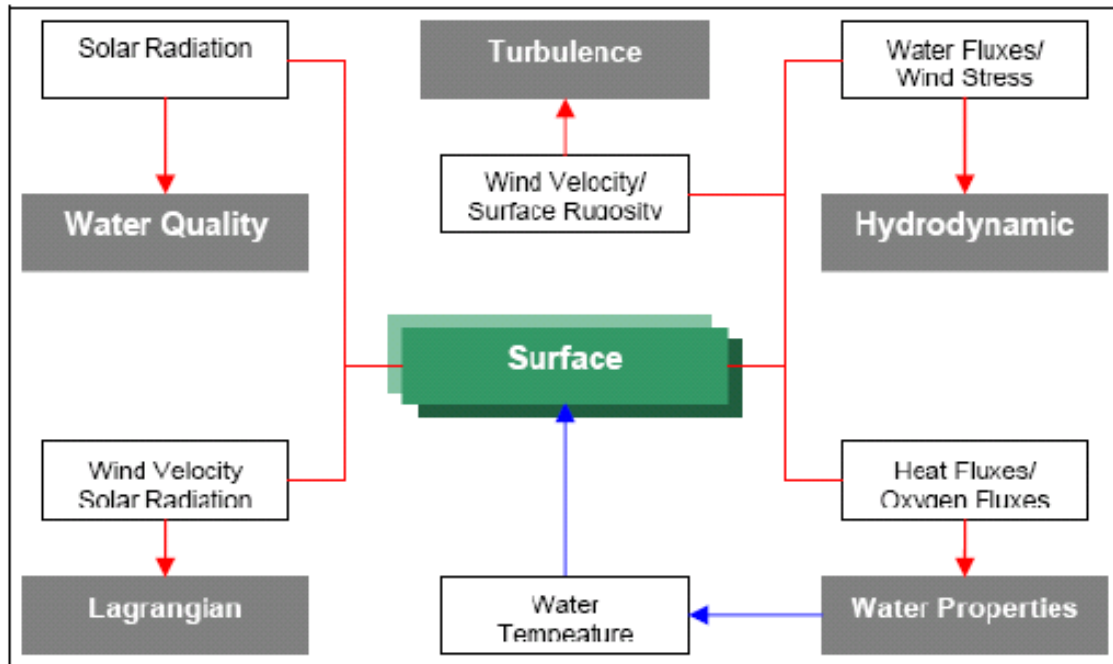


**Figura 2-10 Muestra la dependencia del módulo WaterQuality con otros módulos [Barreto et al. 2009].**

- Surface

El módulo Surface plantea las condiciones de frontera en la superficie de la columna de agua y representa la influencia de forzantes externos atmosféricos como el viento y el sol en la superficie del agua (Figura 2-11).

Hay dos tipos de condiciones. Una dada por el usuario, usualmente datos meteorológicos (velocidad del viento, temperatura del aire, etc.), y otra como condiciones de borde calculadas automáticamente por el modelo a partir de las condiciones o datos meteorológicos.



**Figura 2-11 Muestra la dependencia del módulo Surface con otros módulos [Barreto et al. 2009].**

- FreeVerticalMovement

El módulo FreeVerticalMovement calcula las propiedades del flujo vertical.

Básicamente se usa para determinar el movimiento vertical del flujo. Usualmente se utiliza este módulo para calcular la velocidad de caída al simular sedimentos cohesivos, o la velocidad de distintas partículas en las simulaciones de transporte.

- HydrodynamicFile

El módulo HydrodynamicFile es un módulo auxiliar que le permite al usuario de MOHID integrar espacial y temporalmente la solución obtenida con el modelo en un archivo.

La integración espacial consiste en unir varias celdas para tratarlas como una sola.

Por otro lado, la integración temporal consiste en juntar varios pasos discretos de tiempo de la solución hidrodinámica y puede ser directamente conectada con la integración espacial.

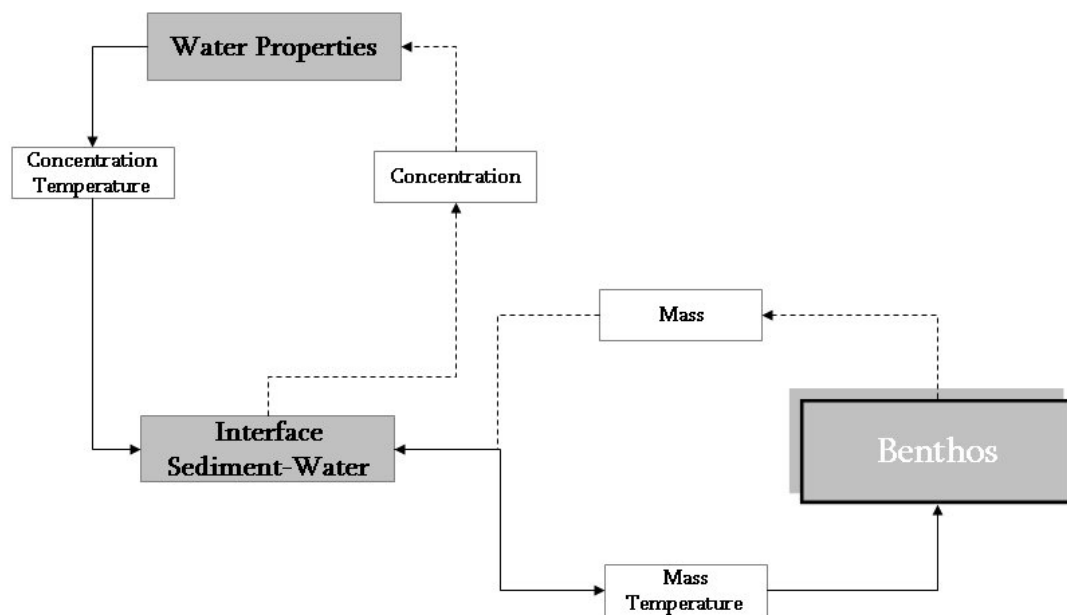
- Turbulence

El módulo Turbulence calcula los coeficientes de viscosidad horizontal y vertical y las difusividades para diferentes métodos de cierre de turbulencia. Estas propiedades pueden ser calculadas de una manera simplificada utilizando coeficientes de difusión constantes. Por otro lado el usuario puede calcular la evolución de las propiedades de flujo turbulento de una manera más realista mediante el modelo GOTM (Global Ocean Turbulence Model). Una interfaz de este módulo calcula los coeficientes utilizando un cierre de turbulencia de una o dos ecuaciones con la subrutina tomada del modelo general de turbulencia oceánica GOTM.

- Módulo Benthos

MOHID Módulo Bentos es un modelo biogeoquímico de dimensión cero y fue diseñado para calcular, utilizando formulaciones simples, algunos de los principales procesos biogeoquímicos que ocurren en un sistema acuático:

- la mortalidad de algas. Si las algas son consideradas como una propiedad de partículas que se hunden.
- Partículas de mineralización de materia orgánica (nitrógeno y fósforo, los ciclos biogeoquímicos);
- Disolución de sílice biogénica;
- El agotamiento del oxígeno.



**Figura 2-12 Información de flujo entre Benthos módulo y los otros módulos**  
[Technical University of Lisbon, 2011]

Cuando se utiliza *ModuleBenthos* este puede ir acompañado, en términos de la mineralización de materia orgánica, disolución de sílice biogénica y de agotamiento del oxígeno, con otros modelos biogeoquímicos incluidos en MOHID tales como: *ModuleWaterQuality* y *ModuleLife*.

### Mortalidad de Algas

Se puede aplicar una tasa de mortalidad sobre las algas depositadas en la interfaz agua-sedimento. El *Módulo Benthos* puede asumir como algas los siguientes determinantes: fitoplancton y las diatomeas

Mientras esto sucede, los depósitos internos de algas de nitrógeno y fósforo se convierten en partículas de materia orgánica, y para el caso específico de las diatomeas, su depósito de sílice se transforma en sílice disuelta. La mortalidad de algas se calcula como,

$$\frac{dM^x}{dt} = -K^x_{mortality} * M^x \quad (16)$$

donde  $M^X$  es la masa depositada de algas (fitoplancton o diatomeas) en (kg de carbono),  $K^X_{mortality}$  es la Tasa de mortalidad de algas.

Por lo tanto, la mortalidad de las algas genera una entrada para el grupo de partículas de materia orgánica, que puede ser representado en nitrógeno orgánico particulado (PON) y el fósforo orgánico particulado (POP).

$$\frac{dM^{PON}}{dt} = -K^X_{mortality} * M^{PON} * \alpha^X_{N:C} \quad (17)$$

donde  $M^{PON}$  se da en kg de Nitrógeno y  $\alpha^X_{N:C}$  es la relación de las algas Nitrógeno / Carbono (que es diferente para fitoplancton y para diatomeas).

$$\frac{dM^{POP}}{dt} = -K^X_{mortality} * M^{POP} * \alpha^X_{P:C} \quad (18)$$

donde  $M^{POP}$  se da en kg de Fósforo y  $\alpha^X_{N:C}$  es la relación de las algas Fósforo / Carbón (que es diferente para fitoplancton y para diatomeas).

De las diatomeas, la sílice biogénica derivada de su mortalidad, se calcula como

$$\frac{dM^{BioSi}}{dt} = -K^X_{mortality} * M^{BioSi} * \alpha^{dia}_{Si:C} \quad (19)$$

donde  $M^{BioSi}$  se da en kg de Silice y  $\alpha^{dia}_{Si:C}$  es la relación de las algas Silice / Carbono (en el caso de simulación de diatomeas).

### Mineralización de la materia orgánica

La mineralización de la materia orgánica se calcula sobre fracciones de nitrógeno y de fósforo, por medio de un índice que depende de la temperatura y teniendo en cuenta que la abundancia bacteriana y su actividad es constante en el tiempo, y también dependiente de la temperatura. Este proceso de mineralización es responsable del agotamiento de oxígeno, pero también es regulado por su disponibilidad. Si los niveles de oxígeno alcanzan la anoxia  $\Phi_{min}^{O_2}$  entonces la mineralización de la materia orgánica se detiene. Esta limitación se calcula como,



$$Lim_{O_2} = \frac{O_2}{O_2 + 0.5} \quad (20)$$

Así, para la fracción de nitrógeno de la materia orgánica, la mineralización se puede calcular para nitrógeno orgánico particulado (NOP) y nitrógeno amoniacal (NH<sub>4</sub>), respectivamente

$$\frac{dM^{PON}}{dt} = -\left(K_{decay-N} * \phi_{PON}^{(T-20C)}\right) * M^{PON} * Lim_{O_2} \quad (21)$$

$$\frac{dM^{NH_4}}{dt} = \left(K_{decay-N} * \phi_{PON}^{(T-20C)}\right) * M^{PON} * Lim_{O_2} \quad (22)$$

donde  $M^{PON}$  se da en kg de nitrógeno,  $K_{decay-N}$  es la tasa de mineralización de referencia para (PON),  $\phi_{PON}$  es un coeficiente de temperatura, y  $T$  es la temperatura del agua en la interfaz agua-sedimento (° C).

En cuanto al fósforo:

$$\frac{dM^{POP}}{dt} = -\left(K_{decay-P} * \phi_{POP}^{(T-20C)}\right) * M^{POP} * Lim_{O_2} \quad (23)$$

$$\frac{dM^{PO_4}}{dt} = \left(K_{decay-P} * \phi_{POP}^{(T-20C)}\right) * M^{POP} * Lim_{O_2} \quad (24)$$

donde  $M^{POP}$  se da en kg de fósforo,  $K_{decay-P}$  es la tasa de mineralización de referencia para (POP),  $\phi_{POP}$  es un coeficiente de temperatura, y  $T$  es la temperatura del agua en la interfaz agua-sedimento (° C).

### Disolución de sílice

La disolución de sílice se simula como una velocidad constante durante la sílice biogénica depositada en la interfaz agua-sedimento, que actúa como fuente de sílice disuelta,

$$\frac{dM^{BioSi}}{dt} = -K_{decay-Si} * M^{BioSi} \quad (25)$$

$$\frac{dM^{DissSi}}{dt} = -K_{decay-Si} * M^{BioSi} \quad (26)$$

donde  $M^{BioSi}$  se da en kg de sílice biogénica,  $M^{DissSi}$  se da en kg de sílice disuelta y  $K_{decay-Si}$  es la velocidad de disolución de la sílice biogénica.

### El agotamiento del oxígeno

El agotamiento del oxígeno se produce debido a la mineralización de materia orgánica, y se calcula de acuerdo a las relaciones estequiométricas.

$$\frac{dM^{O_2}}{dt} = -\left(K_{decay-N} * \phi_N^{(T-20C)}\right) * M^{PON} * \frac{1}{\alpha_{N:C}^{OM}} * \alpha_{O:C}^{CO_2} \quad (27)$$

$$\frac{dM^{O_2}}{dt} = -\left(K_{decay-P} * \phi_N^{(T-20C)}\right) * M^{POP} * \frac{1}{\alpha_{P:C}^{OM}} * \alpha_{O:C}^{CO_2} \quad (28)$$

donde  $M^{O_2}$  esta dado en kg de oxígeno,  $\alpha_{N:C}^{OM}$  y  $\alpha_{P:C}^{OM}$  son los radios de Nitrógeno/Carbono y Fósforo/Carbono de la materia orgánica particulada.

### Esquema numérico

El Módulo *Benthos* resuelve las ecuaciones diferenciales descritas anteriormente mediante un esquema de Euler (método explícito), que fue utilizado con el fin de simplificar en lo posible el código. Cuando se utiliza este método numérico se presentan, sin embargo, algunas restricciones en términos de discretización temporal, que puede causar inestabilidades numéricas que se pueden resolver, en cierta medida, mediante el uso de un intervalo de tiempo menor. “ModuleBenthos” tiene un intervalo de tiempo independiente en relación con el principal tiempo de paso del modelo. Normalmente, el tiempo de paso para integrar las ecuaciones diferenciales que describen este tipo de reacciones biogeoquímicas es mucho mayor que el tiempo de paso utilizado para resolver ecuaciones hidrodinámicas y de transporte, y como el conjunto de ecuaciones de este módulo es muy simple, no hay incrementos importantes en términos de costo computacional cuando se utiliza un intervalo de tiempo menor. A continuación en la Tabla 2-1 se presenta la comparación de las características principales de los modelos anteriormente descritos (COHERENS y MOHID).

Tabla 2-1 Comparación de los modelos COHERENS y MOHID

	<b>COHERENS (Coupled Hydrodynamical – Ecological Model for Regional and Shelf Seas)</b>	<b>MOHID (Modelo Hidrodinámico)</b>
<b>Desarrollo del modelo</b>	Programa de Ciencia y Tecnología Marina [MAST] de la Unión Europea durante el período 1990 – 1998.	Investigadores del MARETEC (Centro de Ambiente y Tecnologías Marítimas) perteneciente al Instituto Superior Técnico (IST) de la Universidad Técnica de Lisboa
<b>Lenguaje de programación</b>	Fortran 77	Inicialmente Fortran 77, ahora Fortran 95
<b>Ecuaciones básicas de hidrodinámica</b>	Ecuación de momentum y de continuidad	Ecuación de momentum y de continuidad
<b>Métodos numéricos de solución de las ecuaciones</b>	Diferencias finitas conservativas que definen un modelo matemático discreto en el tiempo y en el espacio	Aproximación de volúmenes finitos
<b>Componentes</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Componente físico: se solucionan ecuaciones de advección-difusión.</li> <li>2. Componente biológico: se encarga de las dinámicas de variables como el micropláncton, detritus, nitrógeno inorgánico disuelto y oxígeno disuelto.</li> <li>3. Componente de interacción agua-sedimento: se encarga de los procesos de sedimentación y resuspensión de partículas orgánicas e inorgánicas.</li> <li>4. Componente de transporte de contaminantes: puede utilizar transporte Euleriano o Lagrangiano.</li> </ol>	<p>MOHID Water: programa para la simulación tridimensional de cuerpos de agua (océanos, estuarios, embalses, etc.).</p> <p>Componentes: Geometry, Hydrodynamic, Lagrangian, Oil, WaterProperties, WaterQuality, Surface, FreeVerticalMovement, HydrodynamicFile, Turbulence, Bathymetry y Bottom. Estos módulos son responsables de diferentes aspectos hidrodinámicos y de los procesos biológicos.</p>
<b>Interfaz gráfica del usuario</b>	No presenta interfaz gráfica	<p>MOHID GUI: maneja la estructura de directorios y los archivos de datos necesarios para establecer una simulación en MOHID y genera los archivos de salida de la ejecución.</p> <p>MOHID GIS: es una herramienta de tipo sistema de información geográfica que maneja variables temporales y espaciales requeridas o producidas por las aplicaciones de MOHID.</p>

## 2.4 DEMANDA BENTICA

### 2.4.1 Aspectos Generales

El oxígeno disuelto – OD en el agua, además de ser un elemento básico para la supervivencia de los organismos acuáticos, se constituye en un parámetro indicador del estado de la contaminación de una corriente. Las bajas concentraciones de oxígeno disuelto están ligadas, por lo general, a la existencia de sustancias ajenas al ecosistema acuático, que en la mayoría de los casos resultan ser nocivas. Esta es quizás la razón por la cual el diagnóstico sobre el estado de contaminación de una corriente de agua empieza inevitablemente con un balance de oxígeno disuelto [Mateus, 2011].

Procesos como la reaeración, la fotosíntesis y la entrada de oxígeno disuelto desde los afluentes se constituyen en las principales fuentes de oxígeno en el agua. Por el contrario, el consumo o disminución del oxígeno en el agua está relacionado con otros procesos como la oxidación del material carbonáceo y nitrogenado (procedente de residuos y descargas realizadas), *la demanda de oxígeno ejercida por los sedimentos* y la respiración de las plantas acuáticas [Thomann, Mueller, 1987].

La demanda de oxígeno por sedimentos bénticos SOD (por sus siglas en inglés “Sediment Oxygen Demand”), o demanda béntica, está relacionada con la oxidación de la materia orgánica presente en los sedimentos del fondo. Estos depósitos bénticos o bancos de lodo, generalmente tienen un alto contenido de materia orgánica debido a que se forman de partículas de aguas residuales así como de partículas alóctonas [Chapra, 1997].

Sin embargo, la demanda béntica no siempre se debe a los lodos de residuos industriales o domésticos. Los residuos orgánicos solubles pueden algunas veces resultar en el crecimiento de bacterias filamentosas, tales como las *Sphaerotilus*, las cuales pueden consumir altas cantidades de oxígeno. La muerte de plantas acuáticas con raíces, hojas y detritus puede contribuir al sedimento de material orgánico, el cual también requiere oxígeno para su estabilización. Finalmente, la sedimentación de fitoplancton en sistemas eutroficados puede causar un incremento significativo de la demanda béntica [Thomann, Mueller, 1987].

El proceso de demanda béntica ocurre por dos fenómenos que se desarrollan en la interfaz agua – sedimento. En el primero, aeróbico, el oxígeno penetra la capa de lodo béntico y es luego consumido por los sedimentos orgánicos en descomposición. En el segundo, ocurre una descomposición anaeróbica de la capa más interna de lodo y las sustancias orgánicas reducidas se ponen en contacto con la columna de agua, siendo oxidadas, consumiendo oxígeno.

Los materiales orgánicos son descompuestos por las bacterias a través de un proceso anaerobio. Los materiales orgánicos, como grasas, proteínas y carbohidratos, son convertidos a ácidos orgánicos solubles, por un grupo de bacterias llamadas “formadoras de ácido”. Si las condiciones son favorables, un segundo grupo de bacterias llamadas “formadoras de metano”, convierten los ácidos orgánicos en productos gaseosos; el proceso completo está representado por la producción final de metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), los cuales constituyen aproximadamente entre el 95 y el 98% de los gases producidos. Los gases restantes están formados por ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) e hidrógeno ( $\text{H}_2$ ).

Las bacterias formadoras de ácido viven en un rango muy amplio de condiciones ambientales, mientras que las formadoras del metano son muy sensibles a los cambios; por esta razón, la fase formadora del metano es el paso que controla el proceso de descomposición. Si las bacterias formadoras del metano son inhibidas, las bacterias formadoras de ácidos bajarán tanto el pH que casi toda la actividad bacterial será suspendida. La descomposición que ocurre en tales condiciones es la descomposición béntica.

Igualmente, la demanda béntica es afectada por las condiciones del fondo del cuerpo hídrico, las cuales varían desde grandes depósitos de residuos de origen doméstico e industrial a depósitos relativamente poco profundos de origen vegetal y arenas y rocas libres de lodo. La utilización del oxígeno por los sedimentos del fondo depende de la extensión y distribución del material orgánico y la naturaleza de la comunidad béntica [Thomann, Mueller, 1987].

### 2.4.2 Observaciones

La demanda béntica de oxígeno es típicamente medida por 3 métodos: Dos aproximaciones basadas en modelos observados de niveles de oxígeno y una basada en

mediciones directas. En la primera aproximación se desarrolla un modelo del cuerpo de agua y se determinan todas las tasas excepto la SOD. La SOD puede ser estimada ajustando su valor hasta que las predicciones del modelo coincidan con los niveles observados de OD. Aunque este método de calibración fue extendido en los primeros años tempranos de la modelación, este es defectuoso porque asume que todos los otros parámetros del modelo (reaireación, tasas de desoxigenación, etc.) son conocidos con confianza. Los valores obtenidos con este método no son mejores que estimaciones del orden de magnitud.

La segunda aproximación se basa en un modelo expresamente diseñado para lagos estratificados. Para tales sistemas de aguas profundas (el hipolimnion) puede ser idealizado como un sistema cerrado, y la demanda de oxígeno en el área hipolimnética se determina como

$$AHOD = \frac{o_2 - o_1}{t_2 - t_1} H_h \quad (29)$$

donde  $AHOD$  es la demanda de oxígeno en el área hipolimnética ( $\text{gO m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ),  $o_2$  y  $o_1$  son niveles de oxígeno hipolimnéticos ( $\text{mg L}^{-1}$ ) medido en dos momentos,  $t_1$  y  $t_2$  (d), durante el periodo estratificado y  $H_h$  es el espesor medio del hipolimnion (m). Si se supone que la causa principal del agotamiento del oxígeno en esta capa es la descomposición de materia orgánica en la superficie de los sedimentos, el oxígeno disuelto que se estratifica provee una estimación de la SOD. Es decir se asume que  $S_b' \approx AHOD$ .

Esta aproximación tiene un número de deficiencias relacionadas con suposiciones fundamentales. Debe distinguirse entre descomposición en la columna de agua y en los sedimentos; mientras que el primer proceso no suele ser tan importante, en sistemas profundos la suposición debe ser cumplida; además, el transporte ocurre aunque los gradientes térmicos disminuyan la transferencia de masa entre la capa superficial y la de fondo. [Chapra, 1997].

El método de estimación final envuelve mediciones directas. Esto se hace encerrando los sedimentos y un poco de agua en una cámara midiendo la concentración de oxígeno disuelto en el tiempo. Esta aproximación se aplica en laboratorio y en campo. Como con

todas las medidas de microcosmos, esta prueba tiene el inconveniente que al encerrar el agua en una cámara hace que el sistema sea diferente del ambiente natural.

En general, valores entre 1 y 10  $\text{gm}^{-2}\text{d}^{-1}$  son considerados indicativos de sedimentos enriquecidos [Chapra, 1997].

### 2.4.3 LAKE 2K

LAKE2K (o L2K) [Chapra *et al.*, 2011] es un modelo que está diseñado para calcular las tendencias estacionales de la calidad del agua en lagos estratificados. L2K se desarrolló en el entorno de Microsoft Windows y se programó en el idioma de Windows macro: Visual Basic para Aplicaciones (VBA). Excel se utiliza como interfaz gráfica de usuario.

A continuación se nombran las hojas que incluye el modelo:

- Hoja de cálculo de LAKE2K
- Hoja de cálculo Elevación-Área
- Hoja de cálculo de datos de entrada
- Hoja de cálculo de salida
- Hoja de cálculo de condiciones iniciales
- Hoja de cálculo de mezcla vertical
- Hoja de cálculo de meteorología
- Hoja de cálculo de hielo
- Hoja de cálculo de luz y calor
- Hoja de cálculo de tasas

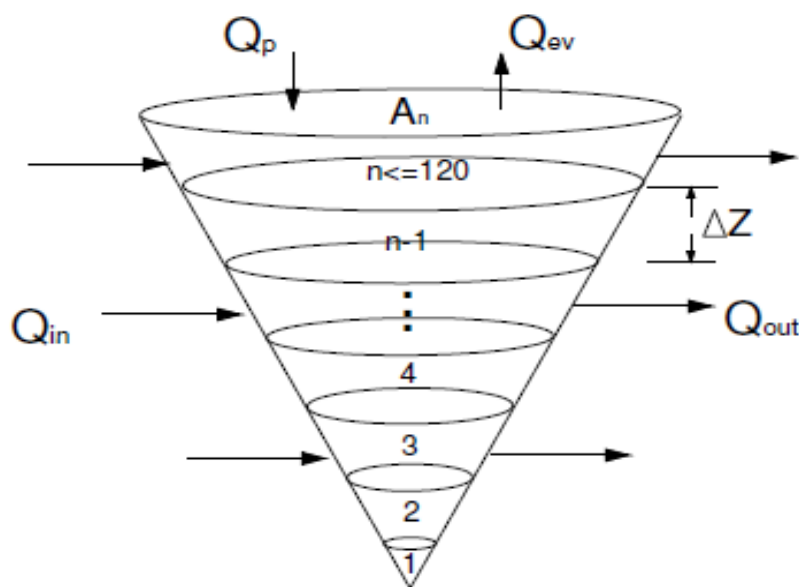
El manual de documentación para los usuarios ha sido escrito para la versión beta del modelo. El modelo ya ha sido probado, ha sido depurado y se sometió a pruebas numéricas para confirmar que produce resultados numéricos precisos. Una versión beta representa el software que se destina a ser ejecutado por usuarios seleccionados antes de su distribución general.

#### ▪ TEORIA DEL MODELO

##### Física

La última versión de LAKE2K se basa en una formulación nueva multi-capa diseñada para proporcionar una gran flexibilidad para simular la estratificación térmica en lagos

profundos (Figura 2-13). El usuario puede especificar en esta versión hasta 120 capas durante la puesta en marcha del modelo. La conceptualización de la mezcla y el transporte en el modelo también se ha mejorado en la nueva versión incorporando relaciones más mecanicistas para el análisis de las entradas, salidas y mezcla en un lago. Estas nuevas características son discutidas en detalle en las siguientes secciones durante la explicación de los componentes del modelo. Las mejoras fundamentales se basan en los procedimientos y los algoritmos desarrollados originalmente para el modelo utilizado CE-QUAL-R1 [U.S. Army Corps of Engineers, 1986]. En la nueva formulación de multi-capa, los volúmenes de las capas se mantienen constantes durante el tiempo de simulación y solo la capa superior se le permite cambiar su volumen de acuerdo a la masa de agua en equilibrio en el lago. Sin embargo, para evitar la pérdida de resolución en caso de incrementos importantes en el volumen del lago, el usuario tiene la capacidad de especificar un espesor de capa máximo y mínimo para cada simulación. Si el volumen de la capa superior supera este espesor de capa máximo durante una simulación, la capa se reduce a la mitad y se introduce una nueva capa en el sistema para almacenamiento del medio adicional de volumen después de la división. Por el contrario, si la capa superior reduce su volumen y su espesor cae por debajo del espesor de capa mínimo, la capa se elimina del sistema y su volumen es añadido a la siguiente capa.



**Figura 2-13 Balance hídrico y esquema de segmentación vertical en LAKE2K**  
[Chapra *et al.*, 2011]

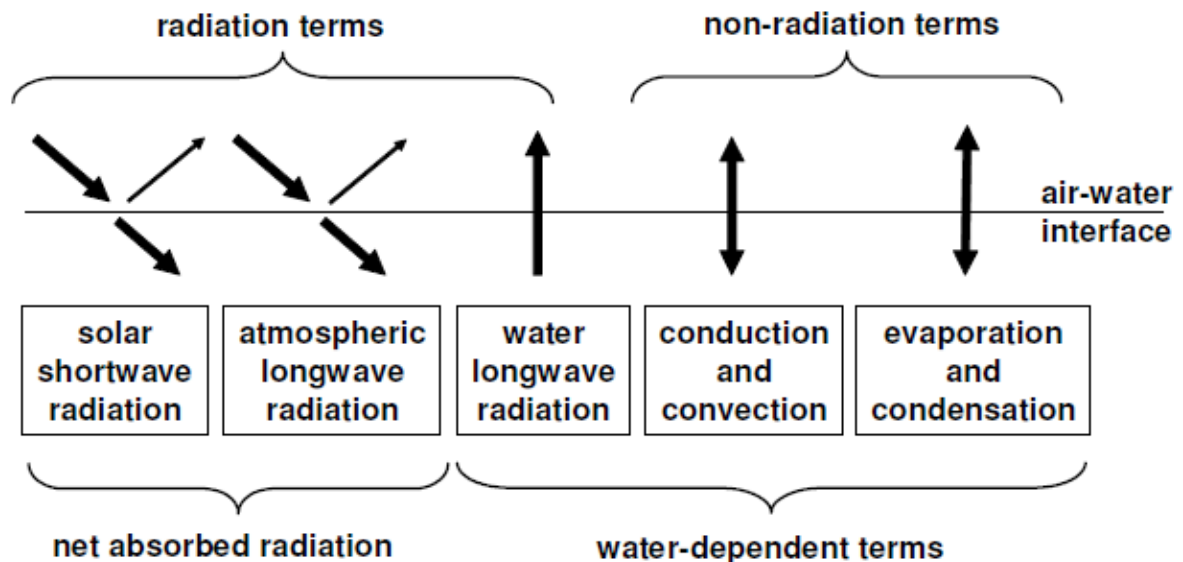


### Modelo de temperatura

Como se muestra en la Figura 2.15 de intercambio de calor superficial se modela como una combinación de cinco procesos:

$$J_h = I(O) + J_{an} - J_{br} - J_c - J_e \quad (30)$$

donde  $I(O)$  es la radiación solar neta de onda corta en la superficie del agua,  $J_{an}$  es la radiación atmosférica neta de onda larga,  $J_{br}$  es la radiación de fondo de onda larga desde el agua  $J_c$  es la conducción y  $J_e$  es la evaporación. Todos los flujos se calculan internamente en (Kcal / m<sup>2</sup>/sec) y se expresa en los resultados como (cal/cm<sup>2</sup>/d).



**Figura 2-14 Componentes de intercambio de calor de superficie [Chapra et al., 2011]**

El balance de calor de la superficie sigue siendo conceptualmente la misma que la utilizada en la versión anterior de LAKE2K. Sin embargo, la implementación numérica del balance fue modificada con el fin de ser coherente con los procedimientos y algoritmos para el análisis de los procesos de mezcla y el cálculo de la distribución vertical de la radiación solar en el lago.

### Constituyentes del modelo

Los constituyentes del modelo se enumeran en la Tabla 2-2.

**Tabla 2-2** Variables de estado del modelo [Chapra *et al.*, 2011]

Variable	Símbolo	Unidades*
Conductividad	s	μmhos
Sólidos suspendidos inorgánicos	m <sub>i</sub>	mgD/L
Oxígeno disuelto	o	mgO <sub>2</sub> /L
Carbono orgánico particulado	C <sub>p</sub>	mgC/L
Carbono orgánico disuelto	C <sub>f</sub>	mgC/L
Nitrógeno orgánico	n <sub>o</sub>	μgN/L
Nitrógeno amoniacal	n <sub>a</sub>	μgN/L
Nitratos	n <sub>n</sub>	μgN/L
Fósforo orgánico	p <sub>o</sub>	μgP/L
Fósforo inorgánico	p <sub>i</sub>	μgP/L
Sílice inorgánica	s <sub>i</sub>	mgSi/L
Fitoplancton	a <sub>pl</sub>	μgA/L
Zooplancton herbívoro	z <sub>h</sub>	mgC/L
Zooplancton carnívoro	z <sub>c</sub>	mgC/L
Fitoplancton 2	a <sub>p1</sub>	μgA/L
Fitoplancton 3	a <sub>p2</sub>	μgA/L

\* mg/L ≡ g/m<sup>3</sup> y μg/L ≡ mg/m<sup>3</sup>

Una ecuación de balance de masa se escribió para cada capa vertical. Para el epilimnion, para el caso donde la entrada y salida pasan directamente el equilibrio se escribe como:

$$V_1 \frac{dc_1}{dt} = Q_{in}c_{in} - Q_{out}c_1 + E_1(c_2 - c_1) + S_1V_1 \quad (31)$$

donde  $c_i$  es la concentración de la capa  $i$  [mg / L o mg / L],  $c_{in}$  es la concentración de la afluencia [mg / L o mg / L], y  $S_i$  son las fuentes y sumideros de la Constituyente, debido a las reacciones de transferencia de masa mecanismos [g/m<sup>3</sup>/d o mg/m<sup>3</sup>/d]. Balances similares han sido escritos para las otras capas.

### SOD / Modelo de flujo de nutrientes

Los flujos de sedimentos y nutrientes de la demanda de oxígeno de sedimentos (SOD) se basan en un modelo original desarrollado por Di Toro [Di Toro, 1993,2001].

El esquema del modelo se representa en la Figura 2-15. Como puede verse, el enfoque permite al oxígeno y a los nutrientes de flujos agua-sedimento ser calculados sobre la base del flujo descendente de partículas de materia orgánica del agua suprayacente. Los sedimentos se dividen en 2 capas: una delgada a (1 mm) de superficie de capa aeróbica sustentada por una más gruesa (10 cm) capa inferior anaeróbica. Carbono orgánico, nitrógeno y fósforo se entregan a los sedimentos anaeróbicos a través de la solución de partículas de materia orgánica (es decir, el fitoplancton y detritus). Allí ellos son transformados por reacciones de mineralización en metano disuelto, amonio y fósforo inorgánico. Estos componentes son transportados a la capa aeróbica, donde el metano y amonio se oxidan. El flujo de oxígeno del agua necesaria para estas oxidaciones es la demanda de oxígeno de los sedimentos. Las secciones siguientes proporcionan más detalles sobre cómo el modelo calcula la SOD junto con los flujos de agua-sedimento de carbono, nitrógeno y fósforo que también se generan en el proceso.

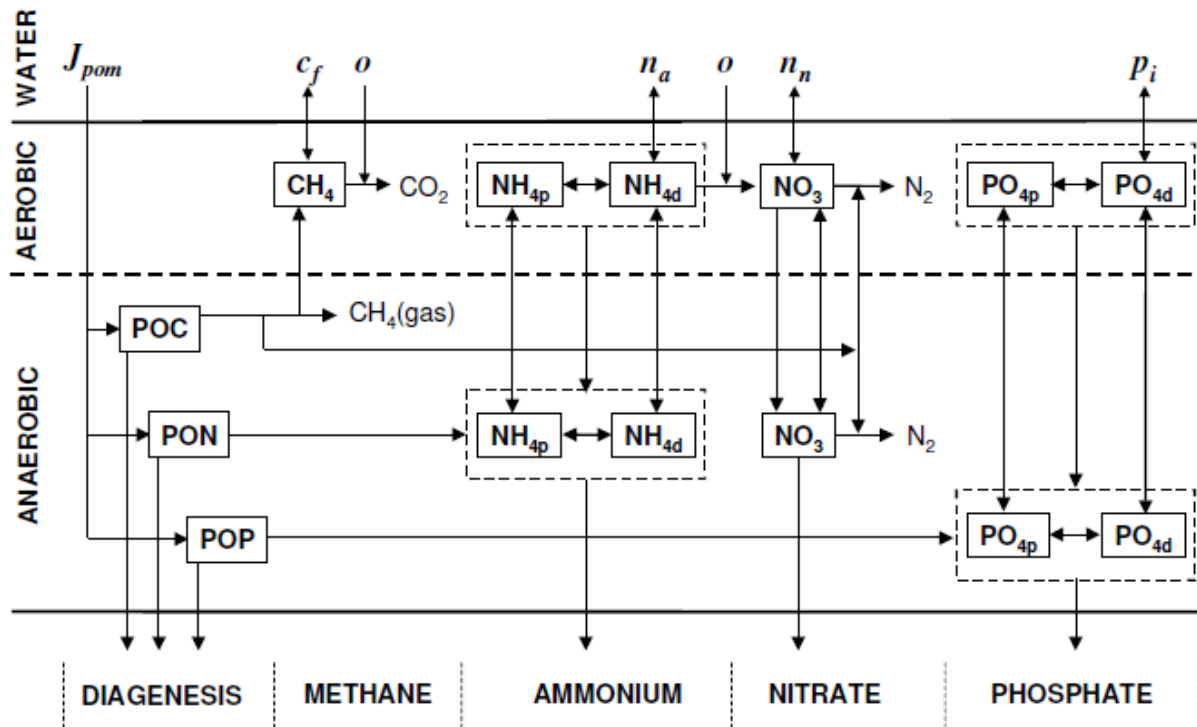


Figura 2-15 Esquema del modelo de flujo de SOD-nutrientes de los sedimentos  
[Pelletier, Chapra, 2006]

## SOD

El SOD [ $\text{gO}_2/\text{m}^2/\text{d}$ ] es igual a la suma del oxígeno consumido en la oxidación de metano y nitrificación,  $SOD = CSOD + NSOD$  donde  $CSOD$  es la cantidad de demanda de oxígeno generado por la oxidación del metano [ $\text{gO}_2/\text{m}^2/\text{d}$ ] y  $NSOD$  es la cantidad de demanda de oxígeno generado por la nitrificación [ $\text{gO}_2/\text{m}^2/\text{d}$ ].

## 2.5 Conclusiones

En el presente capítulo se ha presentado una revisión de los modelos hidrodinámicos y de calidad de agua, MOHID-COHERENS, mostrando detalladamente cada uno de los componentes más importantes de cada programa.

El modelo MOHID es un modelo tridimensional, desarrollado por MARETEC (Investigaciones Marinas y Ambientales del Centro de Tecnología) en el Instituto Superior Técnico (IST), que pertenece a la Universidad Técnica de Lisboa. Además MOHID permite la adopción de una filosofía integrada de modelación, no sólo de los procesos (físicos y biogeoquímicos), sino también de diferentes escalas (permitiendo el uso de modelos anidados) y sistemas (estuarios y cuencas). La integración de MOHID con diferentes herramientas, (MOHID Agua, MOHID tierra y MOHID suelo) se puede utilizar para estudiar el ciclo del agua en un enfoque integrado. Dado que estas herramientas se basan en el mismo marco, su acoplamiento es fácil de lograr.

El modelo COHERENS es un modelo hidrodinámico y de calidad del agua tridimensional que permite usos múltiples de modelo para costas y plataformas marinas, que está acoplado con modelos biológicos de resuspensión y de contaminantes, y resoluciones mesoescale a procesos de escala estacionales. El programa se desarrolló durante el período de 1990-1998 por un grupo multinacional europeo, como parte del perfil de los proyectos de MAST (Marine Science and Technology Programme) financiado por la Unión Europea.

En la parte final del capítulo, se define la demanda béntica y se presentan algunos tipos de medición de esta magnitud. También una revisión general enfatizada en la demanda béntica de los sedimentos y del modelo LAKE2K utilizado para estimar el valor de la SOD existente en el embalse.

## **3.Aplicación de los modelos COHERENS, MOHID y LAKE2K al embalse del Muña**

### **3.1 Introducción**

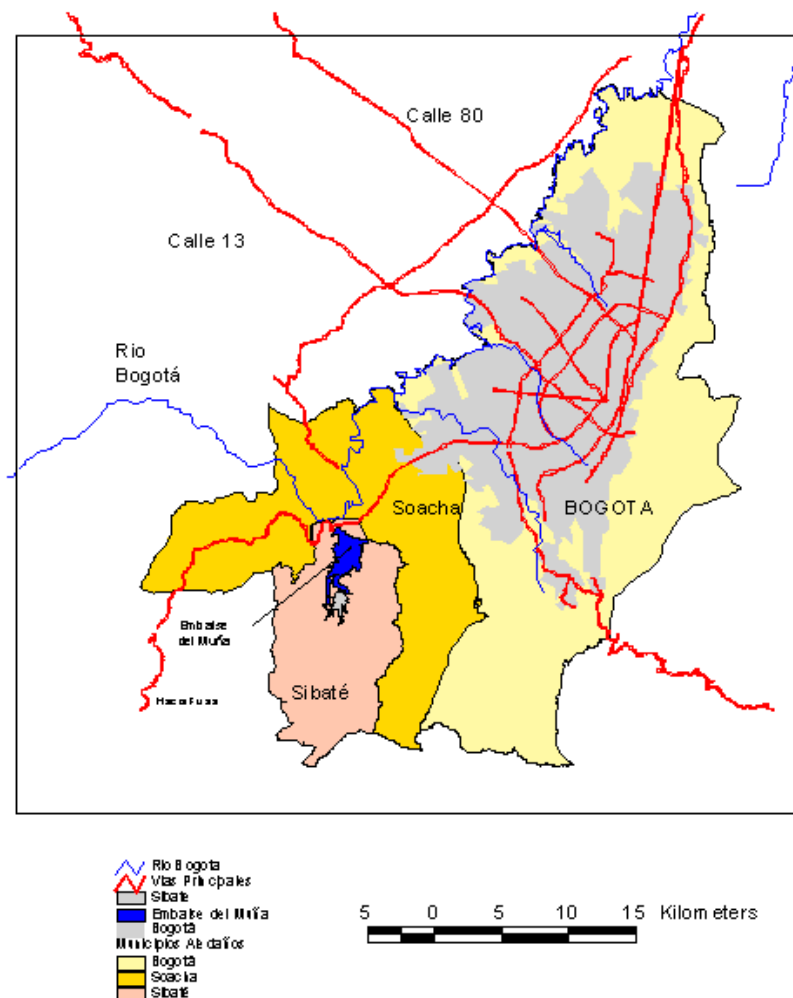
En este capítulo se describe de forma general el montaje realizado de los modelos COHERENS-MOHID seleccionados para realizar la modelación hidrodinámica y de calidad de agua del embalse del Muña dada la robustez que presentan en comparación con el modelo EFDC. También se presenta la aplicación del modelo LAKE2K utilizado para estimar el valor de la demanda béntica existente debida a los sedimentos y plantas acuáticas presentes en el fondo del embalse.

En la primera parte del capítulo, se presenta una breve descripción de la zona de estudio. Además se describe la información básica (batimetría, campos de vientos y series de caudales de entrada y salida, series de determinantes de calidad de agua, etc.) necesaria para la modelación exitosa del embalse incluyendo el tiempo de simulación.

Posteriormente se presenta un análisis detallado del proceso realizado con cada programa para la modelación del embalse. De manera particular para COHERENS se presentan las limitaciones y cambios realizados al código además del programa realizado en Visual Basic que grafica los archivos de salida del modelo. A diferencia del modelo anteriormente mencionado, MOHID cuenta con una interfaz grafica que facilita la entrada y salida de datos adaptada para la plataforma Windows, por esta razón no es necesario realizar modificaciones al código y únicamente se muestra una prueba de series sintéticas para observar el comportamiento del modelo. Dado que la modelación con L2K se lleva a cabo en el entorno de Microsoft Windows y se utiliza Excel como interfaz gráfica de usuario, no se presento mayor dificultad en el montaje del modelo.

### 3.2 Descripción de la zona de estudio

El embalse Muña está ubicado al final de la cuenca media del río Bogotá ( $74^{\circ} 14' 59''$  longitud Oeste y  $4^{\circ} 32' 27''$  latitud Norte), aproximadamente 24 Km al sur de la ciudad de Bogotá [EMGESA; Universidad de los Andes, 1998], tal como muestra la Figura 3-1.



**Figura 3-1 Ubicación del Embalse del Muña [Díaz, 2004]**

El área drenada es de  $120 \text{ km}^2$ , el área inundada en su nivel máximo es de  $957 \text{ ha}$ , el volumen máximo de acuerdo con la batimetría original es de  $42 \text{ Mm}^3$ , el nivel máximo de operación es en la cota  $2569.5 \text{ m.s.n.m.}$  y el nivel mínimo en  $2555.6 \text{ m.s.n.m.}$ , la longitud máxima es de  $6.5 \text{ km}$ , la capacidad máxima del rebosadero de  $118 \text{ m}^3/\text{s}$  y la capacidad instalada de bombeo es de  $64.5 \text{ m}^3/\text{s}$  [EEB, 1994]. En la Figura 3-2 se muestra la descripción general del embalse.

La entrada y salida de caudales en el embalse comparado con su tamaño están muy cerca la una de la otra, lo que crea un corto circuito haciendo que el periodo de retención hidráulica sea de unas pocas horas.

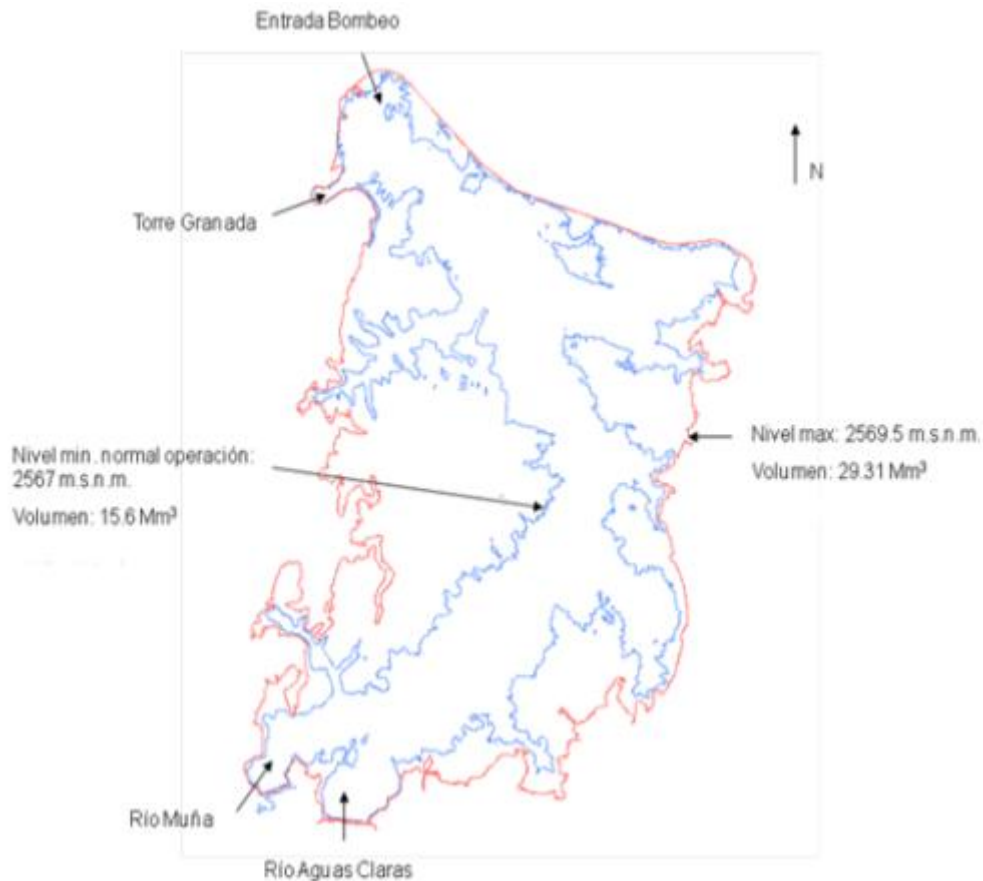


Figura 3-2 Descripción general del Embalse [EMGESA *et al.*, 2005]

### 3.3 Información utilizada

#### 3.3.1 Batimetría

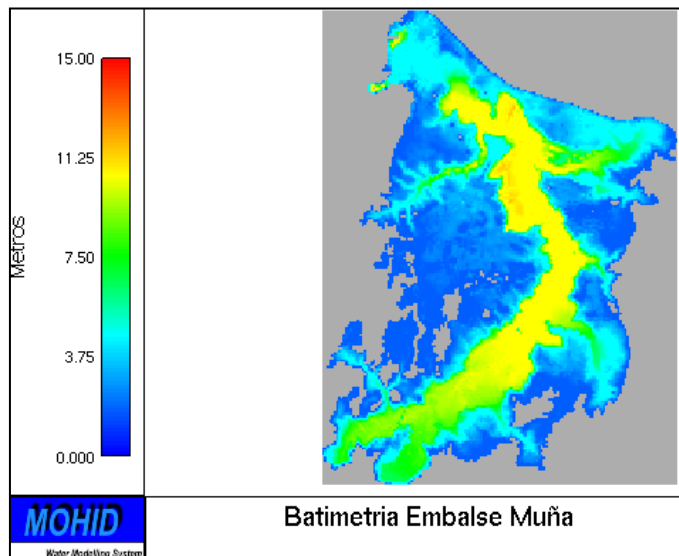
La batimetría del embalse del Muña levantada en campo por EMGESA en el año 2002, se utilizó para generar las mallas correspondientes para los modelos hidrodinámicos. Para esto, los puntos batimétricos  $[x, y, z]$  se procesaron con Eagle Point para generar la superficie del vaso del embalse y a partir de ésta se generaron las curvas de nivel correspondientes con Surfer [EMGESA *et al.*, 2006]. Para la malla utilizada en COHERENS y MOHID se tuvo en cuenta la capacidad de los modelos y la estabilidad

numérica según el criterio Courant el cual define que el paso de tiempo  $\Delta t$  no puede ser tan grande que el agua pueda moverse más de la longitud  $\Delta x$  del segmento para una velocidad dada  $U$ . En otras palabras, el criterio de estabilidad especifica que si el cálculo "se adelanta a sí mismo" este "estallará" [Chapra, 1997].

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{U} \quad (32)$$

Con el fin de tener una alta resolución en la zona del embalse de entrada del bombeo y de salida en Torre Granada, se adoptó una cuadrícula de 20m x 20m cada elemento. El menor valor de  $\Delta t$  es de 1 segundo para los dos modelos usados, ya que si se utiliza un  $\Delta t$  mayor los programas computacionales se vuelven inestables al no garantizar la estabilidad numérica del criterio de Courant y muestran mensajes de error al correrlos.

Se generó una malla que tiene en planta 153 x 204 celdas, de las cuales 17,151 son húmedas. Adicionalmente se dividió la columna del cuerpo de agua en 5 capas en profundidad. En definitiva el mallado batimétrico en los modelos contiene 85,755 elementos. En la Figura 3-3 se observa la batimetría mostrada por MOHID.

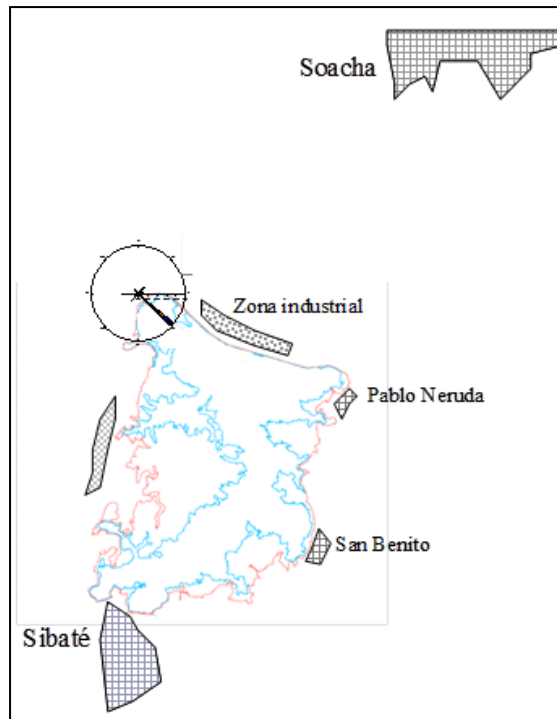


**Figura 3-3 Batimetría embalse del Muña (generada por MOHID)**



### 3.3.2 Series de viento

Para el análisis del régimen de vientos en el embalse del Muña del estudio “Definición y Valoración Técnica de Alternativas de Sectorización, Operación, Manejo y Modelación Hidrodinámica y de Calidad del Agua del embalse del Muña” desarrollado por EMGESA, EEB, EAAB y Uniandes (2005) se contó con información diaria de dirección y velocidad en la estación climatológica Muña (2120561), ubicada hacia el norte del embalse en las coordenadas N 993600 y E 981280, y una altitud de 2565 msnm. Los registros disponibles de velocidad media diaria y dirección promedio diaria cubren los siguientes años: 1996, 1997, 1998, 1999 y 2001. En la Figura 3-4 se muestra el plano del Embalse junto con la ubicación aproximada de la estación climatológica representada por el centro del diagrama de rosa de vientos y las áreas urbanas cercanas.



**Figura 3-4 Embalse del Muña y ubicación de la estación climatológica [EMGESA et al., 2005]**

En general, la dirección predominante del viento es sureste, con velocidades promedio de 2 m/s, con valor máximo diario registrado de 4.4 m/s y mínimo de 0.9 m/s. Esta dirección predominante del sureste es evidente en los meses de junio, julio, agosto y septiembre donde su frecuencia es mayor al 60%. En los meses de febrero, marzo, abril

y mayo la dirección predominante también es del sureste pero con frecuencias mayores del 30%, y con el oeste como segunda dirección predominante. Los meses de octubre, noviembre y diciembre, las segundas direcciones predominantes son suroeste y noreste. El mes de enero la rosa de vientos es la más variable en dirección, siendo la dirección oeste la predominante, seguida de la sureste y la suroeste. El mes de mayor velocidad promedio es julio con 2.3 m/s, seguido de agosto con 2.2 m/s y de junio con 2.1 m/s. El mes de menor velocidad promedio es noviembre con 1.7 m/s [EMGESA *et al.*, 2005]. Para el caso de la presente tesis se contó con series de tiempo de viento obtenidas del estudio anteriormente mencionado. Los valores implementados se muestran en el Anexo A.

### 3.3.3 Caudales de bombeo y de turbinación

Existen dos entradas de agua al embalse, una es por bombeo de las aguas del río Bogotá desde Alicachín y la otra es por los diques ubicados en la zona sur que separan al embalse de sus colas por donde recibe las aguas de los ríos Muña y Aguas Claras. Esta última entrada no se incluyó en la modelación debido a su bajo caudal comparado con los caudales bombeados al embalse del río Bogotá.

Las estaciones de bombeo de Alicachín están conformadas por una bomba de 8 m<sup>3</sup>/s y tres bombas de 17.5 m<sup>3</sup>/s de capacidad. Por consiguiente, las combinaciones posibles de caudales de bombeo son: 0, 8, 17.5, 25.5, 35, 43, 52.5 y 60.5 m<sup>3</sup>/s como se muestra en la Tabla 3-1 Caudales de bombeo en Alicachín [EMGESA *et al.*, 2005]. Estos valores son los más frecuentes en los registros horarios de bombeo, indicando que a lo largo de la respectiva hora se bombeó con la correspondiente combinación de bombas.

**Tabla 3-1 Caudales de bombeo en Alicachín [EMGESA *et al.*, 2005]**

<b>Combinación Bombas</b>	<b>Caudal (m<sup>3</sup>/s)</b>
3 de 17.5 y 1 de 8 (m <sup>3</sup> /s)	60.5
3 de 17.5 (m <sup>3</sup> /s)	52.5
2 de 17.5 m <sup>3</sup> /s y 1 de 8 (m <sup>3</sup> /s)	43
2 de 17.5 (m <sup>3</sup> /s)	35
1 de 17.5 (m <sup>3</sup> /s) y 1 de 8 (m <sup>3</sup> /s)	25.5
1 de 17.5 (m <sup>3</sup> /s)	17.5
1 de 8 (m <sup>3</sup> /s)	8

De acuerdo con los registros horarios de turbinación en Pagua para el período de análisis, el caudal turbinado osciló entre 0 y 53.57 m<sup>3</sup>/s, con un valor promedio de 17.5 m<sup>3</sup>/s y una desviación estándar de 14.61 m<sup>3</sup>/s [EMGESA *et al.*, 2005].

### 3.3.4 Calidad de agua

Los datos de calidad de agua utilizados en este estudio corresponden a concentraciones de demanda bioquímica de oxígeno, nitrógeno amoniacal, nitrógeno orgánico, nitratos, fósforo orgánico, fósforo inorgánico, coliformes totales, sólidos suspendidos totales y oxígeno disuelto. Los valores de los determinantes de calidad se tomaron del proyecto denominado “Modelación dinámica de la calidad del agua del Río Bogotá” [UNAL-EAAB, 2011] para diferentes escenarios de simulación (Anexo A). Las concentraciones iniciales en el embalse fueron estimadas a partir de mediciones del Plan de seguimiento y monitoreo – PSM [EEB - Grucon 2005] y tomadas del estudio "Definición y Valoración Técnica de Alternativas de Sectorización, Operación y Manejo Y modelación hidrodinámica y de calidad del agua del embalse del muña fase III [EMGESA *et al.*, 2006] (Tabla 3-2).

**Tabla 3-2** Concentraciones iniciales en el Embalse (mg/l) [EMGESA *et al.*, 2006]

Concentraciones iniciales en el Embalse (mg/l)	
DBO total	28
Fósforo	2.86
Nitrógeno Amoniacal	9.37
Nitrógeno Orgánico	6.51
Nitratos	0.18
Ortofosfatos	2.34
Oxígeno Disuelto	1.3
Coliformes Totales (NMP / 100 mL)	320000
SST	291.9

### 3.3.5 Datos adicionales

Adicionalmente se requiere dar información de las condiciones iniciales representadas por radiación solar, salinidad, temperatura del aire, humedad relativa, entre otras. Las otras condiciones iniciales de igual manera que el análisis del régimen del viento presente en el embalse, se tomaron del estudio "Definición y Valoración Técnica de

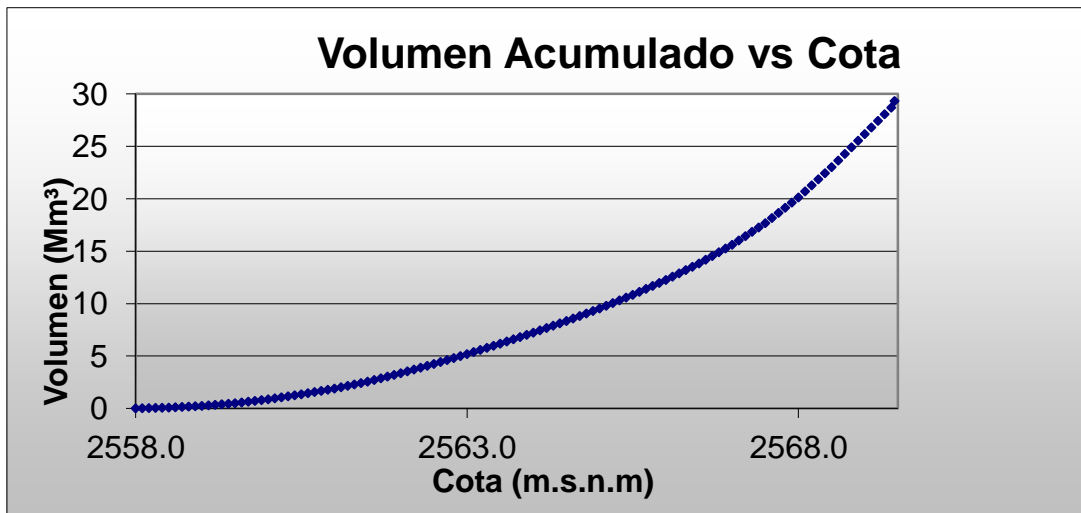
Alternativas de Sectorización, Operación y Manejo Y modelación hidrodinámica y de calidad del agua del embalse del muña fase III [EMGESA *et al.*, 2006]. Los valores medios mensuales disponibles de radiación solar, humedad relativa, temperatura y brillo solar cubren los años desde 1996 hasta el año 2003.

### 3.4 Tiempo de simulación

Con el fin de determinar el tiempo de simulación, se halló el tiempo de residencia en el Muña utilizando la curva de capacidad total (Figura 3-5) sabiendo que:

$$t = \frac{V}{\bar{Q}} \quad (33)$$

donde  $t$  es el tiempo de residencia,  $V$  el Volumen del Embalse y  $\bar{Q}$  el caudal medio.



**Figura 3-5 Curva de capacidad total**

Siendo  $\bar{Q} = 17.5 \text{ m}^3/\text{s}$  de la serie real medida en el embalse y utilizando el volumen de capacidad media  $\bar{V} = 8.98 \text{ Mm}^3$ , se tiene:

$$t = \frac{8985855.27 \text{ m}^3}{17.5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}} * \frac{1 \text{ dia}}{86400 \text{ s}} \approx 6 \text{ días} \quad (34)$$

Considerando que la relación observada entre el período de simulación y el tiempo de ejecución computacional es de 3 a 1 para el modelo MOHID y de poco menos de 2 a 1 para el modelo COHERENS el cual varía dependiendo los módulos activados, el número de escenarios de simulación y los parámetros de tiempo utilizados para ambos modelos, el tiempo de simulación utilizado fue de 5 veces el tiempo de residencia en el embalse, 30 días (720 horas), lo que equivale a 10 y 20 días tiempo real para los cálculos en MOHID y COHERENS respectivamente.

### **3.5 Escenarios de simulación**

Haciendo uso de los modelos COHERENS y MOHID, se realizaron simulaciones con el fin de analizar el comportamiento hidrodinámico y definir la capacidad de asimilación de carga contaminante del embalse.

De igual manera que las series de viento, se utilizaron las series de caudales (Anexo A) obtenidas del estudio “Definición y Valoración Técnica de Alternativas de Sectorización, Operación, Manejo y Modelación Hidrodinámica y de Calidad del Agua del embalse del Muña” desarrollado por EMGESA, EEB, EAAB y Uniandes (2005) en el embalse con un periodo de simulación de 720 horas para estudiar la evolución en el tiempo de las variables de interés. Los escenarios contemplados para la cuenca media y baja del Río Bogotá están enfocados principalmente a evaluar los efectos de distintas alternativas de saneamiento de las aguas residuales aportadas por la ciudad de Bogotá. Específicamente se modelan diferentes niveles de tratamiento en las PTAR’s Salitre y Canoas, a un horizonte de diseño de 2040, en el cual se esperan caudales máximos tratados de 8 y 14 m<sup>3</sup>/s en cada PTAR respectivamente [UNAL-EAAB, 2011]. A continuación se enumeran los diez escenarios definidos, cada uno de los cuales se modela para condición de frontera crítica, cinco en condición hidrológica húmeda y concentración mínima de los determinantes de calidad del agua y cinco restantes en condición hidrológica seca y concentración máxima.

#### **Condición de frontera crítica (Caudal alto - Concentración mínima)**

- Condiciones actuales
- PTAR Salitre con tratamiento secundario (TS) y PTAR Canoas con tratamiento primario (TP).

- PTAR Salitre TS y PTAR Canoas TS (con desinfección en ambas plantas).
- PTAR Salitre TS y PTAR Canoas con mitad TS ( $7 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y mitad sin tratamiento ( $7 \text{ m}^3/\text{s}$ ).
- PTAR Salitre TS y PTAR Canoas con mitad TS ( $7 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y mitad TP ( $7 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

#### **Condición de frontera crítica (Caudal bajo- Concentración máxima)**

- Condiciones actuales
- PTAR Salitre con tratamiento secundario (TS) y PTAR Canoas con tratamiento primario (TP).
- PTAR Salitre TS y PTAR Canoas TS (con desinfección en ambas plantas).
- PTAR Salitre TS y PTAR Canoas con mitad TS ( $7 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y mitad sin tratamiento ( $7 \text{ m}^3/\text{s}$ ).
- PTAR Salitre TS y PTAR Canoas con mitad TS ( $7 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y mitad TP ( $7 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

La PTAR Canoas fue considerada en todos los escenarios simulados a excepción del primero. Al igual que en los escenarios simulados en etapas anteriores, se estimó la calidad del afluente de la PTAR Salitre de acuerdo a factores de remoción actuales predefinidos. Durante las campañas de medición el vertimiento Engativá descargaba directamente sus aguas al río Bogotá. Sin embargo, recientemente ha entrado en funcionamiento el interceptor ENCOR que dirige las aguas residuales a la PTAR Salitre. Por esta razón, en las condiciones actuales simuladas ya se considera este aspecto [UNAL-EAAB, 2011].

## **3.6 Modelo COHERENS**

### **3.6.1 Modificaciones al código COHERENS**

El programa COHERENS fue desarrollado para compilarse con Fortran G77 en sistemas operativos Linux o Unix, por la razón anterior fue necesario para la implementación hidrodinámica del embalse realizar pequeñas modificaciones al código para su compilación y operatividad exitosa en el sistema Windows [EMGESA *et al.*, 2006]. El compilador utilizado fue *Compaq Visual Fortran versión 6.6*. Para lograr una corrida en el

modelo es necesario crear dos aplicaciones .exe. Una de estas se crea en una carpeta llamada “*Munapreproc*” en el archivo *preproc.f* y la otra se crea en otra carpeta llamada “*MunaMain*” en el archivo *mainprog.f*. Si se efectúa alguna modificación al código, es necesario generar las aplicaciones ejecutables de nuevo.

Adicionalmente, se desarrollaron herramientas para facilidad de entrada y salida de datos al y desde el modelo. De esta manera, los datos batimétricos se introducen al modelo mediante salidas generadas por Excel y los resultados producidos por COHERENS son leídos por un programa hecho en Visual Basic que genera a su vez archivos para AutoCad, el cual invoca automáticamente. Estas herramientas incluyen los parámetros del módulo biológico y el módulo de contaminantes.

### 3.6.2 Graficador (Visual Basic)

Este programa es un graficador de los archivos de salida del modelo que representan la velocidad en X, la velocidad en Y, la concentración del contaminante 1 y la concentración del contaminante 2, logrando tener varias imágenes que al unir las crean una película (Anexo B).

## 3.7 Modelo MOHID

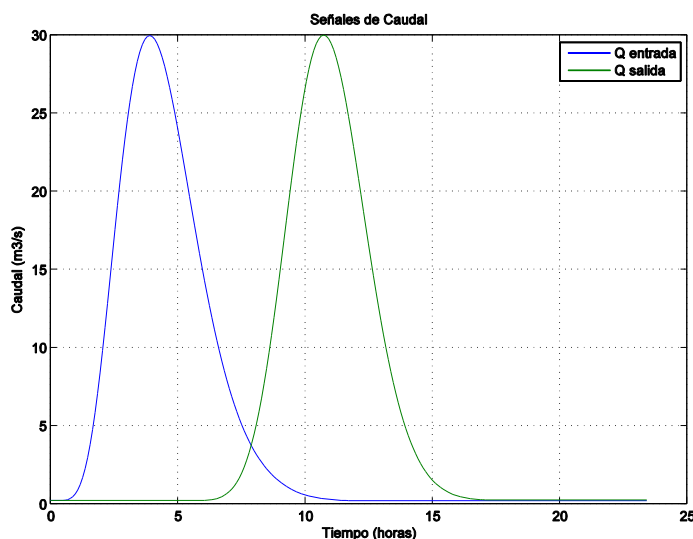
Las principales diferencias entre los dos modelos es que una de las limitaciones mencionadas para el modelo anterior es suplida por este último. (MOHID modela de manera sencilla el agotamiento del oxígeno debido a los sedimentos). Además que este modelo posee una interfaz grafica para utilizar los ejecutables en el sistema operativo Windows y de esta manera no hay que hacer modificaciones al código para ejecutar el modelo ni para observar los resultados. También para la modelación hecha con MOHID se cuenta con más parámetros de calidad de agua que son ingresados de manera no conservativa (series de tiempo). Según la revisión bibliográfica para el embalse del Muña se debe utilizar el programa numérico tridimensional para simular masas de agua superficiales (**embalses**) es MOHID water.

### 3.7.1 Prueba de los modelos con series sintéticas

Debido que no se logró la implementación de series de tiempo con el modelo COHERENS, se presenta la prueba con series sintéticas del modelo MOHID con el fin de observar su comportamiento. Se corrieron series sintéticas bajo condiciones específicas dadas con una duración de 24 horas tiempo real y con 10 de los principales módulos del programa MOHID (Model, Geometry, Hydrodynamic, Water properties, Water quality, Turbulence, Discharge, InterfaceWaterAir, InterfaceSedimentWater, ModuleBenthos). De manera específica:

- Hidrodinámica

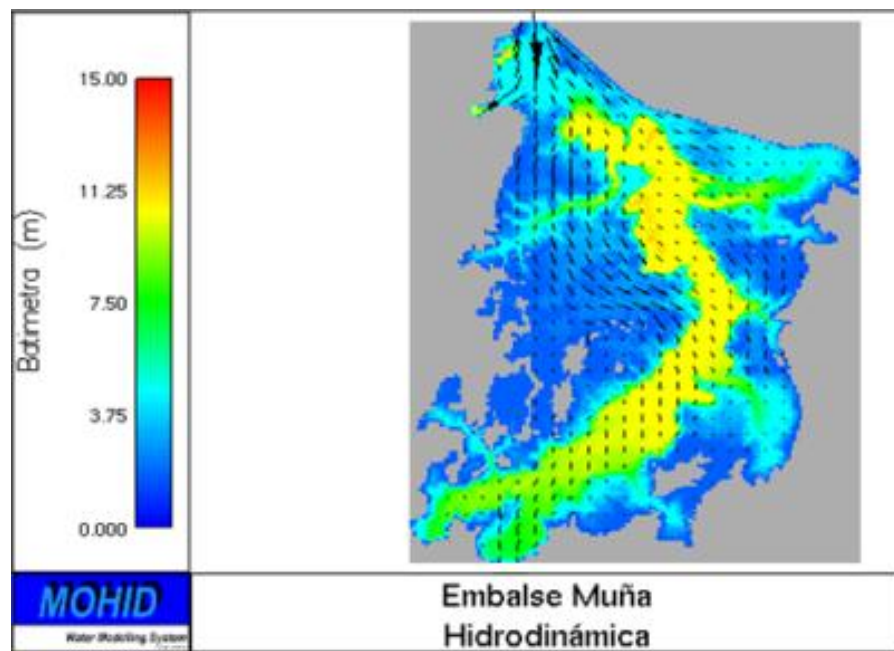
Las series de vientos utilizadas para este caso cuentan con la dirección predominante existente en el embalse (sureste) con velocidades promedio constantes de 2 m/s. Las series de caudales de entrada y de salida utilizadas para esta prueba se muestran a continuación:



**Figura 3-6 Series de Caudal**

Se puede observar en la en la Figura 3-7 que los vectores de velocidad siguen la dirección predominante del viento (sureste) en su capa superficial. Además se encuentra que las magnitudes son mayores a la entrada (Alicachín) y salida (Torre Granada) de caudales en el embalse.





**Figura 3-7 Hidrodinámica en el Embalse con MOHID**

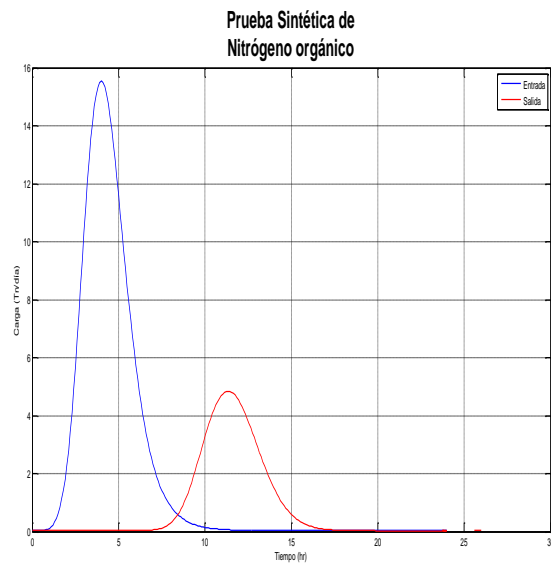
- Calidad de agua

Se modeló el embalse con series sintéticas de 9 determinantes de calidad de agua (DBO, sólidos suspendidos totales, oxígeno disuelto, nitratos, nitrógeno amoniacal, nitrógeno orgánico fósforo inorgánico, fósforo orgánico y coliformes totales), además del módulo *Benthos*, el cual calcula el agotamiento del oxígeno por causa de los sedimentos (Demanda Béntica de Oxígeno). Lo anterior con el fin de entender el fenómeno de dispersión dependiendo las condiciones operativas los valores iniciales y las condiciones de frontera en el embalse sabiendo que

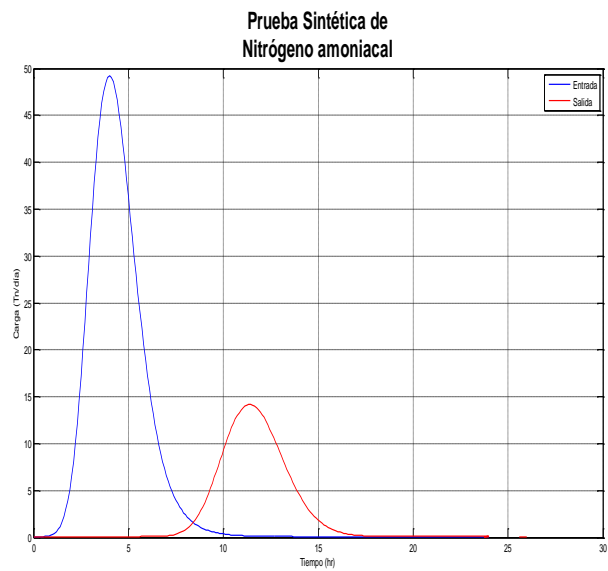
$$W = Q * C \quad (35)$$

donde  $W$  = Carga ( $M T^{-1}$ ),  $C$  = Concentración ( $M L^{-3}$ ) y  $Q$  = Caudal ( $L^3 T^{-1}$ ).

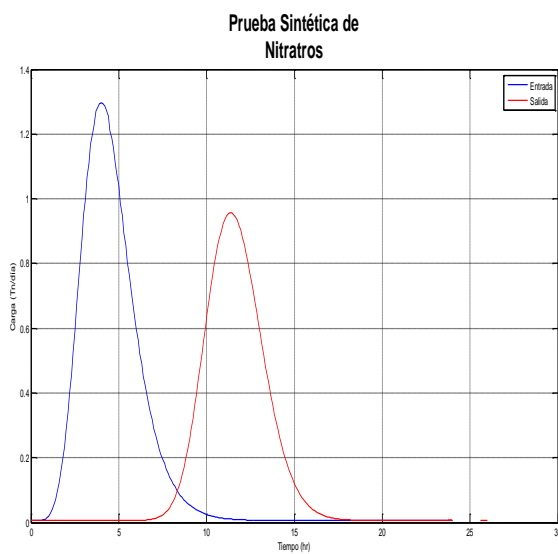
Se cuantificó el decaimiento de la carga (Ton/día) de DBO, coliformes totales, el ciclo del nitrógeno y del fósforo debido al paso del agua por el Embalse, así como la concentración de oxígeno disuelto. Los resultados obtenidos se muestran a continuación en la (Figura 3-8)



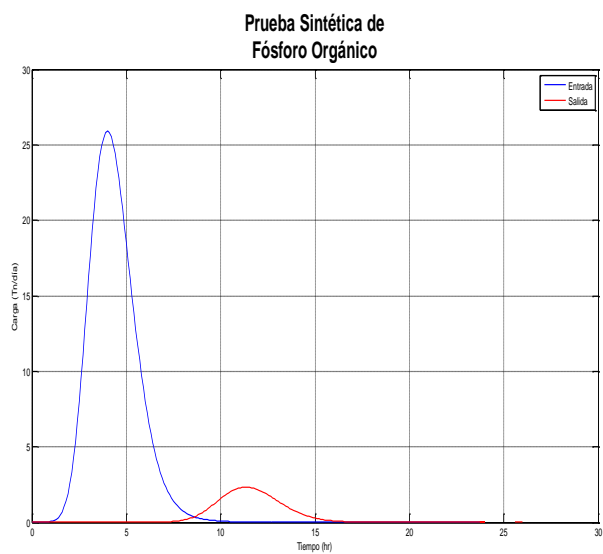
a. Serie de tiempo de la carga de Nitrógeno Orgánico



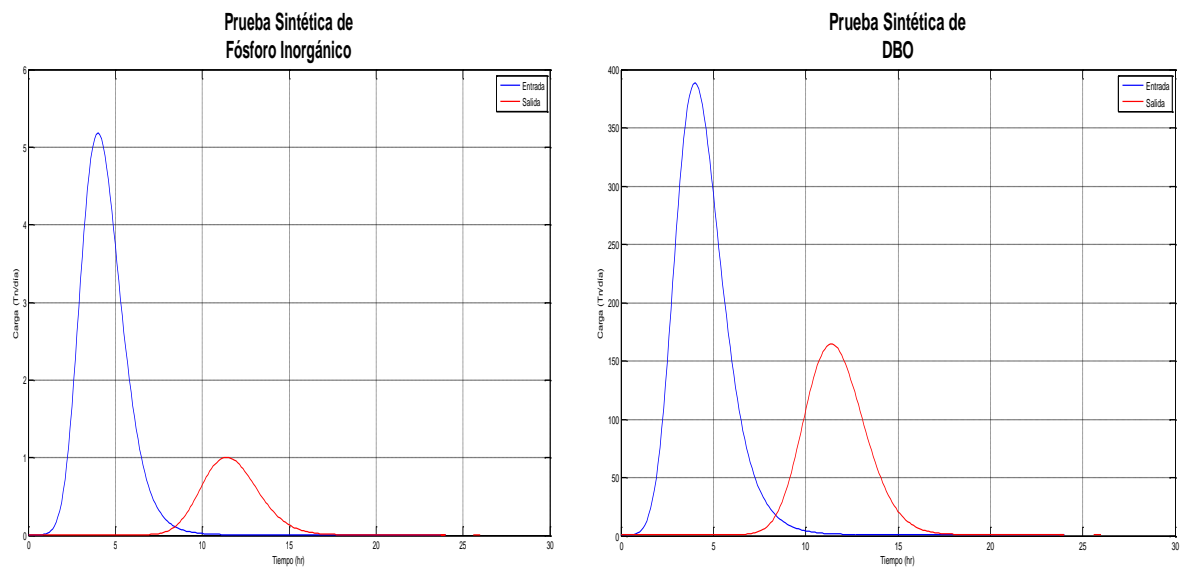
b. Serie de tiempo de la carga de Nitrógeno Amoniacal



c. Serie de tiempo de la carga de Nitratos

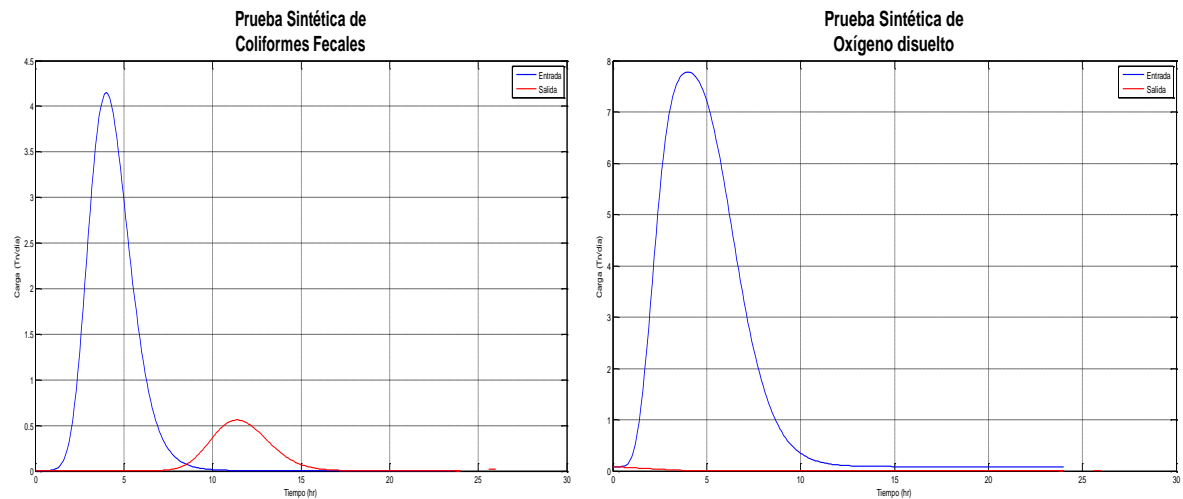


d. Serie de tiempo de la carga de Fósforo Orgánico



e. Serie de tiempo de la carga de Fósforo Inorgánico

f. Serie de tiempo de la carga de Demanda Biológica de Oxígeno



g. Serie de tiempo de la carga de Coliformes Totales

h. Serie de tiempo de la carga de Oxígeno Disuelto

**Figura 3-8 Series sintéticas de determinantes de calidad de agua**

Las graficas incluidas en la Figura 3-8 muestran que existe un abatimiento en las cargas contaminantes de los determinantes de calidad modelados. Para el caso del oxígeno la grafica indica que el embalse bajo las condiciones anteriores es anaerobio, pues los valores de la serie de salida se atenúan hasta el valor muy cercano a 0. En la siguiente sección se realiza un análisis más detallado de la hidrodinámica y de todos los determinantes de calidad de agua para datos reales.

### **3.8 Modelo LAKE2K (L2K)**

De manera particular para el caso del embalse del Muña, se utilizó la información descrita en el Anexo A necesaria para modelar con L2K como la batimetría, las series de vientos, los caudales de bombeo y turbinación, datos iniciales en el embalse, datos de determinantes de calidad de agua y datos adicionales.

### **3.9 Conclusiones**

En el presente capítulo se presenta una descripción de la información utilizada para el montaje en los modelos COHERENS, MOHID y LAKE2K.

Se han presentado las modificaciones hechas al código del modelo COHERENS y el programa realizado en Visual Basic para su compilación en la plataforma Windows, igualmente las limitaciones que se presentan para el caso en particular del embalse del Muña. Por otra parte, para COHERENS no se logró la entrada de series de tiempo al modelo, razón por la cual no se realizó una prueba con series sintéticas.

Para MOHID no fue necesario realizar cambios como los mencionados para el modelo anterior, ya que presenta una interfaz gráfica del usuario permitiendo que el modelo sea más amigable. Teniendo presente lo anterior, se realizó una prueba con series sintéticas la cual se muestra un comportamiento adecuado del modelo MOHID.

## **4. Asimilación de la demanda béntica de oxígeno (SOD)**

### **4.1 Introducción**

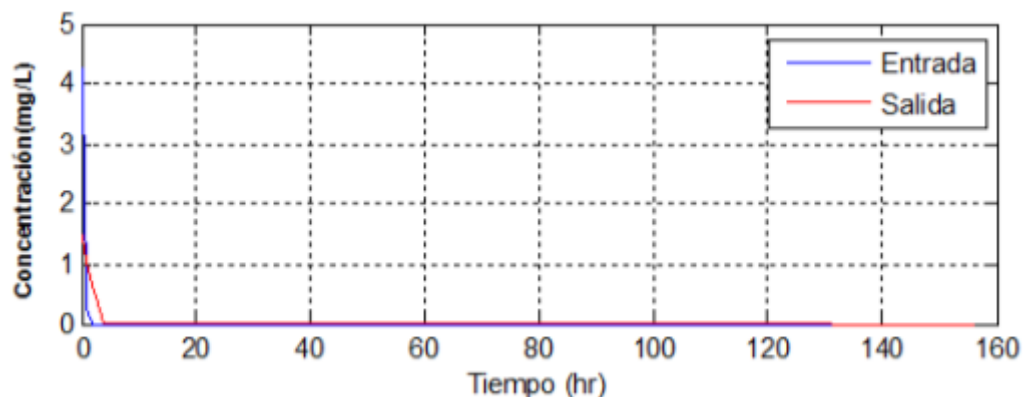
En este capítulo se hace referencia al valor de la demanda béntica de oxígeno ejercida por los sedimentos que se presenta en el embalse debida al enterramiento del buchón. Considerando que el modelo COHERENS no modela (SOD), se utilizó el módulo Benthos del programa MOHID para tener un acercamiento al nivel de agotamiento de oxígeno debido a los sedimentos y el modelo LAKE2K que estima el valor de la demanda béntica presente en el embalse en forma endógena. Para esto se tuvieron en cuenta todos los escenarios de simulación de calidad de agua, además de todos los datos adicionales necesarios para ambos modelos.

En la primera parte del capítulo se muestran los resultados arrojados de la modelación realizada con MOHID teniendo en cuenta el balance de oxígeno hecho con el módulo Benthos el cual fue diseñado para calcular con formulaciones simples del modelo, algunos de los principales procesos biogeoquímicos que ocurren en un sistema acuático entre los cuales está el agotamiento del oxígeno debido a los sedimentos. Además se presentan los valores de demanda béntica estimados por el modelo LAKE2K. Posteriormente se presenta un análisis de los resultados señalados por los dos programas y como se comparan dichos valores con el estudio “Definición y valorización técnica de alternativas de sectorización, operación y manejo y modelación hidrodinámica y de calidad del agua del embalse del Muña Fase III- Capítulo 2” desarrollado por EMGESA, EAAB, EEB y Uniandes, (2006). Finaliza el capítulo, con las principales conclusiones y comentarios de los resultados obtenidos.

## 4.2 Análisis de la Modelación con MOHID (módulo Benthos)

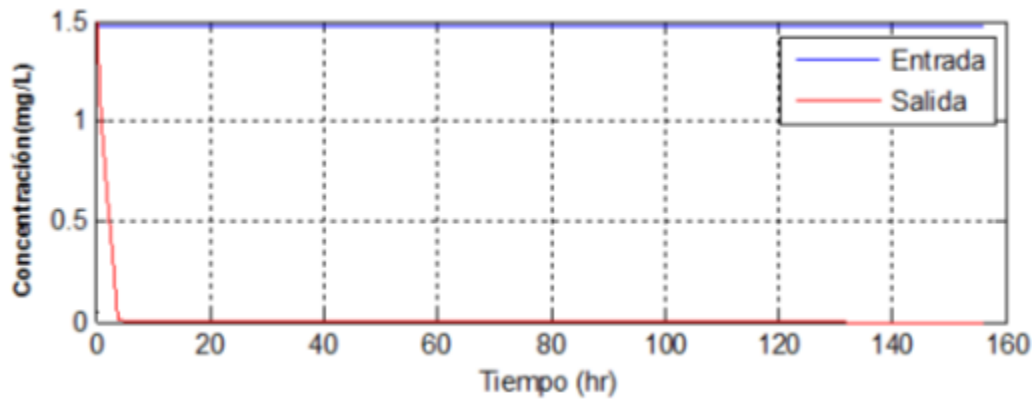
Con el fin de observar el consumo de oxígeno debido a los sedimentos existentes en el embalse, se realizó una modelación observando principalmente el comportamiento del determinante de calidad OD (Oxígeno Disuelto) en la capa superior, considerando el módulo de Benthos de MOHID. Esta modelación se realizó para los escenarios de simulación descritos anteriormente.

Las concentraciones de oxígeno disuelto son mínimas en la parte baja de la cuenca media del río Bogotá, por esto la concentración del afluente y del efluente del embalse es cero. Esto indica que el embalse es anaerobio para todos los cinco primeros escenarios de simulación descritos anteriormente y el valor estimado de demanda béntica es mínimo. Lo anterior dado que los valores de oxígeno se mantienen por debajo de 1mg/L



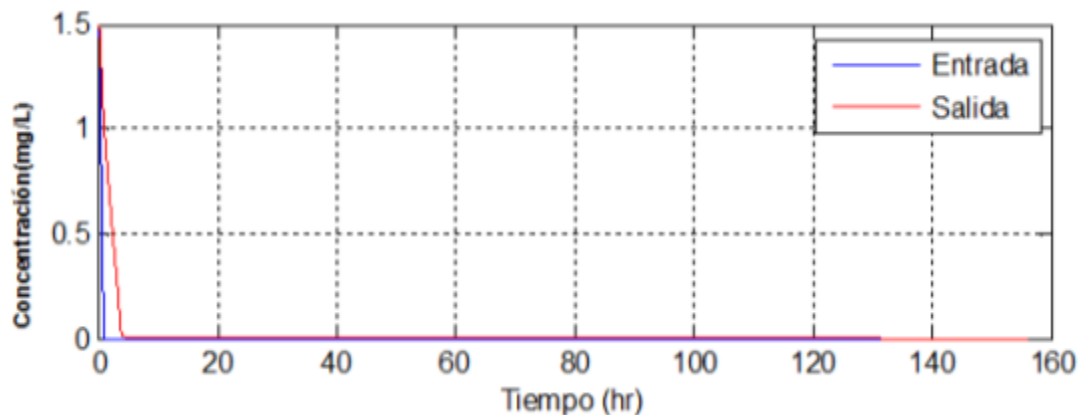
**Figura 4-1 Concentración de oxígeno Condición de frontera crítica (Caudal alto - Concentración mínima)**

A diferencia del caso anterior en la Figura 4-2, se observa que el valor de la concentración de oxígeno disuelto para el primer escenario de simulación bajo la condición de frontera crítica caudal bajo- concentración máxima (condición actual) en el afluente es 1.5 mg/L y de cero en el efluente; esto indica que existe consumo de oxígeno ejercido por los sedimentos y plantas acuáticas presentes en el fondo del embalse.



**Figura 4-2 Concentración de oxígeno Condición de frontera crítica (Caudal bajo – Concentración máxima) “condición actual”**

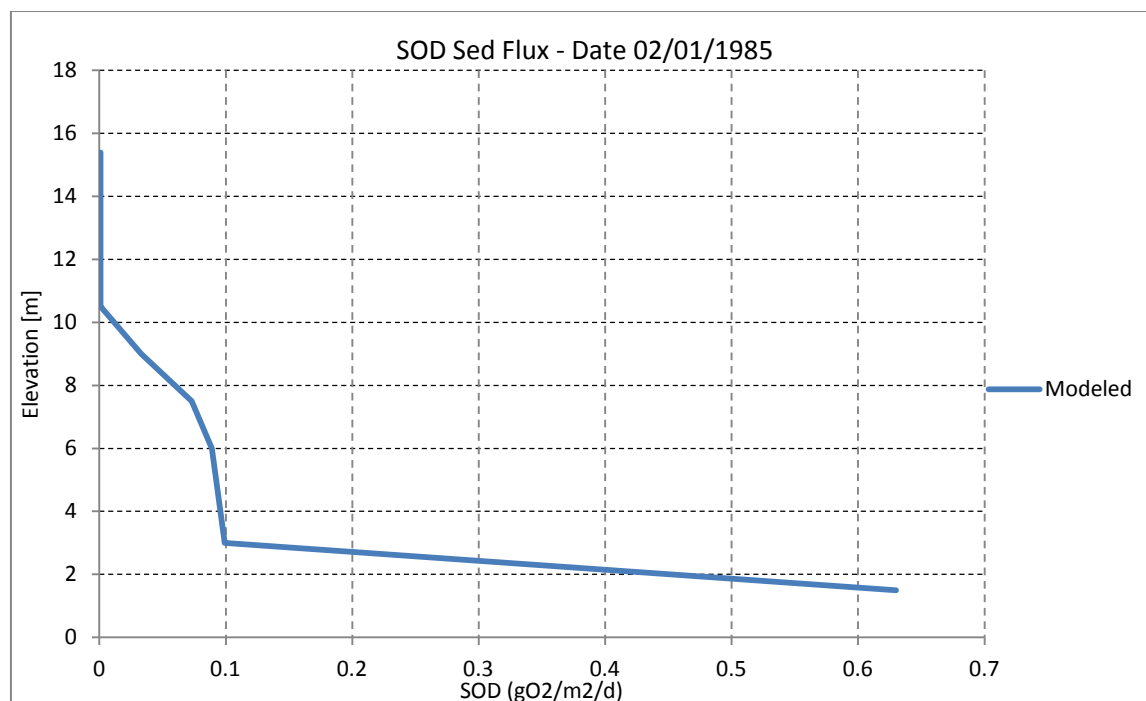
Finalmente, en la Figura 4-3, para los cuatro escenarios de simulación restantes bajo condición hidrológica seca y concentración máxima (PTAR Salitre con tratamiento secundario (TS) y PTAR Canoas con tratamiento primario (TP), PTAR Salitre TS y PTAR Canoas TS (con desinfección en ambas plantas), PTAR Salitre TS y PTAR Canoas con mitad TS ( $7 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y mitad sin tratamiento ( $7 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y PTAR Salitre TS y PTAR Canoas con mitad TS ( $7 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y mitad TP ( $7 \text{ m}^3/\text{s}$ )), se presenta el mismo comportamiento que para los cinco primeros escenarios mencionado. Las concentraciones de oxígeno disuelto en el afluente y efluente se mantienen por debajo de  $1 \text{ mg/L}$ .



**Figura 4-3 Concentración de oxígeno Condición de frontera crítica (Caudal bajo – Concentración máxima) “escenarios restantes”**

### 4.3 Análisis de la Modelación con LAKE2K

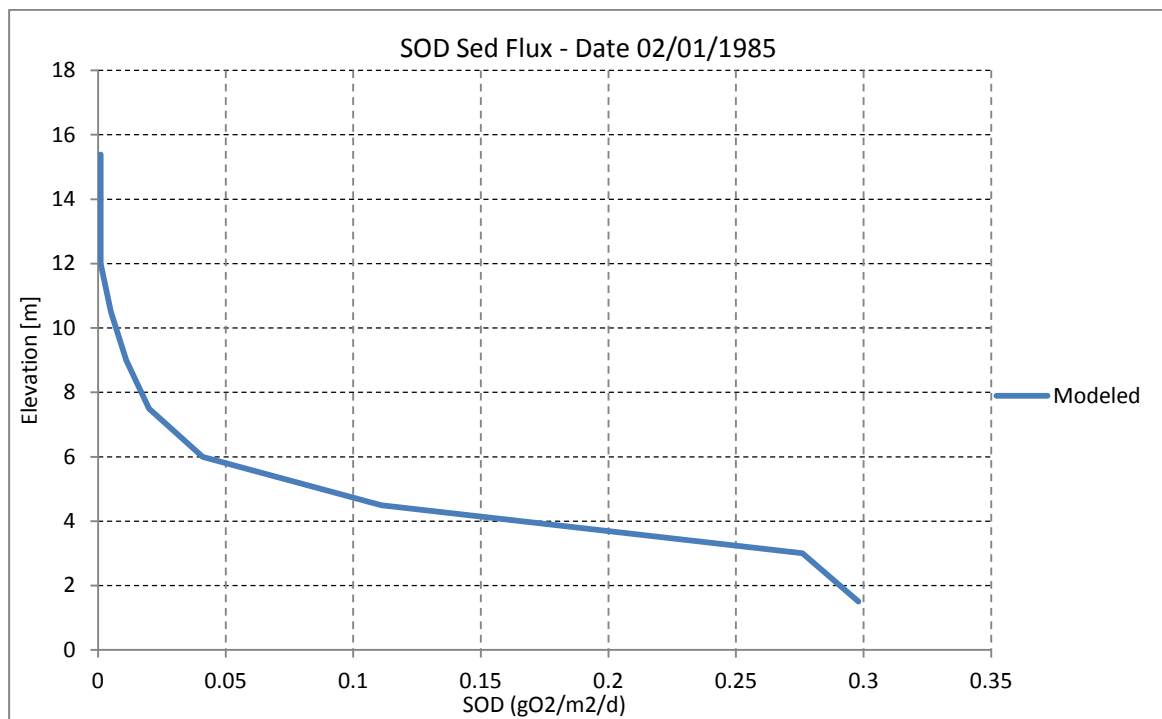
De igual manera que en la sección anterior, se modeló el embalse utilizando el programa LAKE2K. Los resultados para los cinco primeros escenarios de simulación se muestran en la Figura 4-4. Se observan valores entre 0 y 0.63  $\text{gO}_2/\text{m}^2/\text{d}$  de demanda béntica en el embalse. Esto indica que evidentemente pequeñas concentraciones de oxígeno que están siendo consumidas por la descomposición de la materia orgánica presente en el fondo del embalse. No obstante, se observa que el valor de la SOD disminuye rápidamente hasta una profundidad de 3 metros aproximadamente.



**Figura 4-4 Valor de demanda béntica escenarios Condición de frontera crítica (Caudal alto - Concentración mínima)**

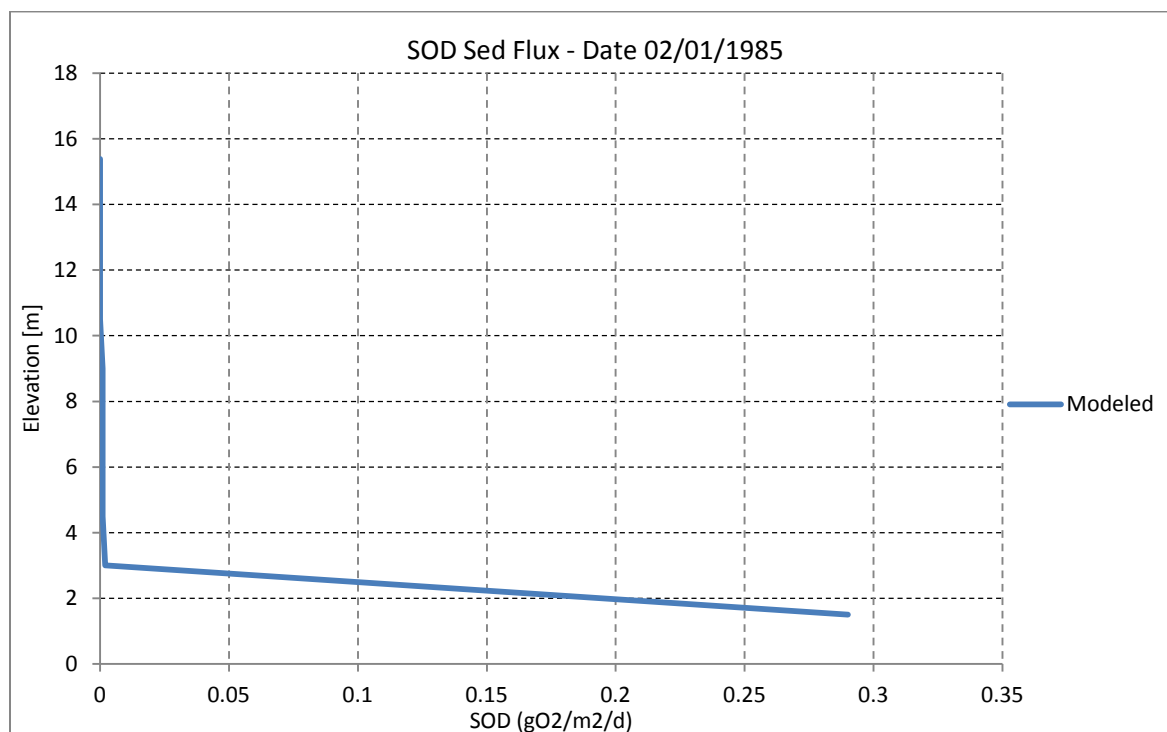
Para el caso del escenario en condición de frontera crítica (caudal bajo – concentración máxima) “condición actual” se presenta un decaimiento exponencial del valor de la demanda béntica con la profundidad. Los valores se encuentran entre 0 y 0.3  $\text{gO}_2/\text{m}^2/\text{d}$  evidenciando que existe un consumo de oxígeno pero que se ve restringido debido que los valores de las concentraciones mencionadas son cercanos a cero y el consumo de oxígeno estaría limitado (Figura 4-5).





**Figura 4-5 Valor de demanda béntica escenario Condición de frontera crítica (Caudal bajo – Concentración máxima) “condición actual”**

Para los últimos cuatro escenarios de simulación bajo la condición inmediatamente descrita, se presenta un comportamiento similar a los escenarios en condición de caudal alto y concentración mínima (Figura 4-4), con la diferencia de que valores iniciales de demanda béntica son menores en este caso ( $0.27 \text{ (gO}_2/\text{m}^2/\text{d})$ ). Se observa en la Figura 4-6 que el valor de la demanda béntica decae rápidamente a cero con la profundidad.



**Figura 4-6 Valor de demanda béntica escenarios Condición de frontera crítica (Caudal bajo – Concentración máxima) “escenarios restantes”**

En el estudio “Definición y valorización técnica de alternativas de sectorización, operación y manejo y modelación hidrodinámica y de calidad del agua del embalse del Muña Fase III capítulo 2” desarrollado por EMGESA, EAAB, EEB y Uniandes, (2006) se midió la demanda béntica endógena y exógena para muestras de lodo en el embalse del Muña, tomadas en los puntos del Club Naval, Pablo Neruda, Dique Hospital y Zona Industrial [EMGESA *et al.*, 2006]. La demanda béntica endógena es la demanda de oxígeno del sedimento para degradar la materia orgánica que hay en este, sin sustratos externos, es decir se mide la cantidad de oxígeno que requiere el sedimento para autoconsumirse. En el laboratorio se empleó agua destilada aireada. La demanda béntica exógena es la demanda de oxígeno del sedimento cuando hay otro sustrato adicional. En ese caso se utilizó agua proveniente del embalse, que como ya se ha visto tiene unos nutrientes, que son usados también como sustrato para la degradación de la materia orgánica [EMGESA *et al.*, 2006].

Los valores máximos, promedios y mínimos de demanda béntica en los cuatro diferentes puntos de muestreo en el embalse se presentan en la Tabla 4-1.

**Tabla 4-1** Valores de demanda béntica sedimentos embalse del Muña [EMGESA *et al.*, 2006]

Punto	Demanda Béntica Endógena (gO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> .día)			Demanda Béntica Exógena (gO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> .día)		
	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo
Club Naval	8.53	2.01	3.71	8.3	3.64	1.96
Dique Hospital	6.1	2.65	1.01	8.32	3.64	1.66
Pablo Neruda	17	4.43	1.41	21.06	4.95	3.16
Zona Industrial	10.53	2.65	1	10.15	4.18	2.44

En el estudio anteriormente mencionado [EMGESA *et al.*, 2006] se realizaron las siguientes observaciones:

- Los valores promedios muestran que la demanda béntica exógena fue mayor que la demanda endógena para todos los puntos de muestreo. Esto puede indicar que si bien el lodo posee un alto contenido de materia orgánica, y una porción de ella es biodegradable, al parecer no se trata de materia muy rápidamente biodegradable
- Las más altas demandas bénticas fueron encontradas en la zona de Pablo Neruda, situación que puede obedecer a la alta cercanía de este punto con la entrada del agua residual al embalse, la cual sedimenta su materia orgánica en la zona norte del embalse. Además la zona de Pablo Neruda cuenta con una buena porción de superficie cubierta por buchón de agua, el cual aporta materia orgánica particulada una vez se hunde cumplido su ciclo vital.
- Los altos valores máximos de demanda béntica en la zona de Pablo Neruda y Zona Industrial pueden estar asociados a materia orgánica fácil y rápidamente disponible para la degradación aerobia. La situación contraria en las otras zonas puede estar asociada a materia orgánica no fresca.

Se realizó la comparación de los valores de demanda béntica endógena medidos para muestras de lodo en el embalse del Muña, tomadas en los 4 puntos mostrados en la

Tabla 4-1 realizado por EMGESA, EAAB, EEB y Uniandes, (2006) y los valores estimados por el modelo LAKE2K.

Se observa que los valores medidos de demanda béntica endógena en el embalse mostrados en la Tabla 4-1 son mayores que los valores reportados por L2K. Aunque estos valores son bajos se confirma que efectivamente existe un consumo de oxígeno debido a los sedimentos presentes en el embalse para degradar la materia orgánica.

Comparando los valores promedios obtenidos de demanda béntica para los diez escenarios de simulación con el modelo LAKE2K y los valores reportados por la literatura se observa que el tipo de sedimento según L2K existente en el embalse se encuentra en demanda de oxígeno en el área hipolimnética - Lagos; a diferencia de lo anterior, los datos medidos [EMGESA, 2006] y mostrados en la Tabla 4-1 muestran que el tipo de fondo presente en el embalse se encuentra entre Lodo de Alcantarillado Municipal alrededor del desagüe (Tabla 4-2).

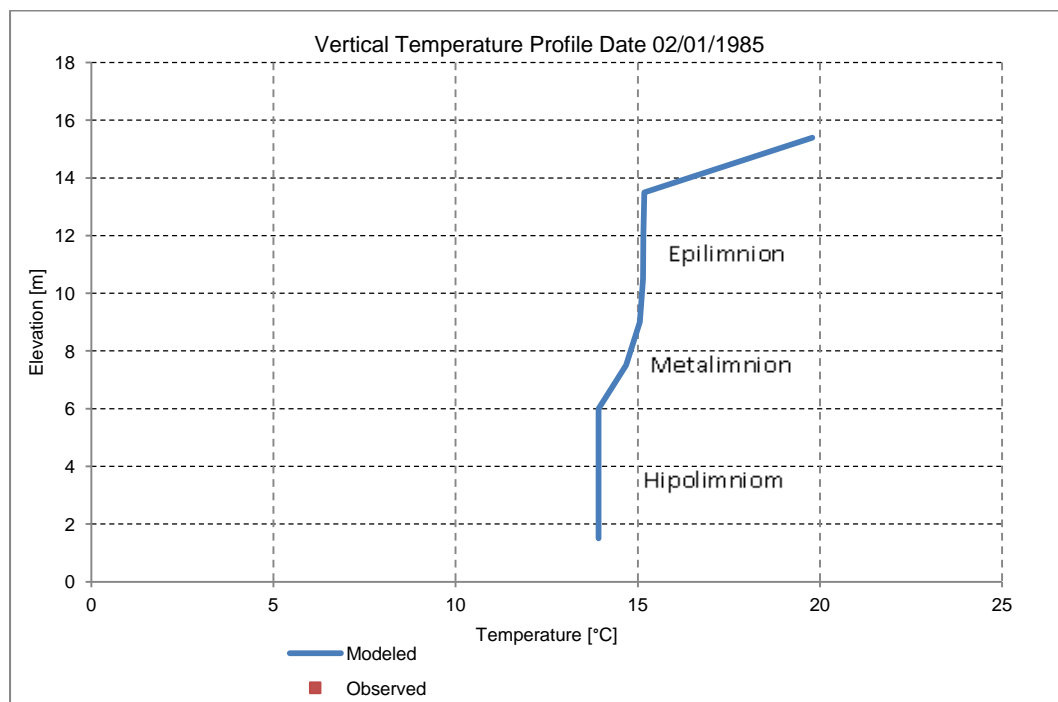
**Tabla 4-2** Valores de demanda béntica de oxígeno [Chapra, 1997]

Tipo de fondo y ubicación	Demanda béntica ((gO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> .día) 20°C	
	Valor promedio	Rango
Sphaerolitus	7	-
Lodo de alcantarillado municipal:		
Alrededores del desagüe	4	2-10
Aguas abajo del desagüe	1.5	1-2
Lodo de Estuario	1.5	1-2
Fondo arenoso	0.5	0.2-1
Suelos minerales	0.07	0.05-1
Demanda de oxígeno en el área hipolimnética - Lagos		0.06-2

Finalmente, en la Figura 4-7 se observa el perfil de temperatura para los primero 5 escenarios de modelación indicando estratificación en el embalse, es decir, podemos encontrar 3 capas de características

- El epilimnion es la capa superficial del embalse, rica en oxígeno.
- El metalimnion o termoclina es la franja de agua intermedia que separa la superficie del fondo. Se caracteriza por la caída exponencial y continua de temperatura hasta llegar al hipolimnion.
- El hipolimnion está formado por las aguas profundas del lago que prácticamente están a la misma temperatura durante todo el año.

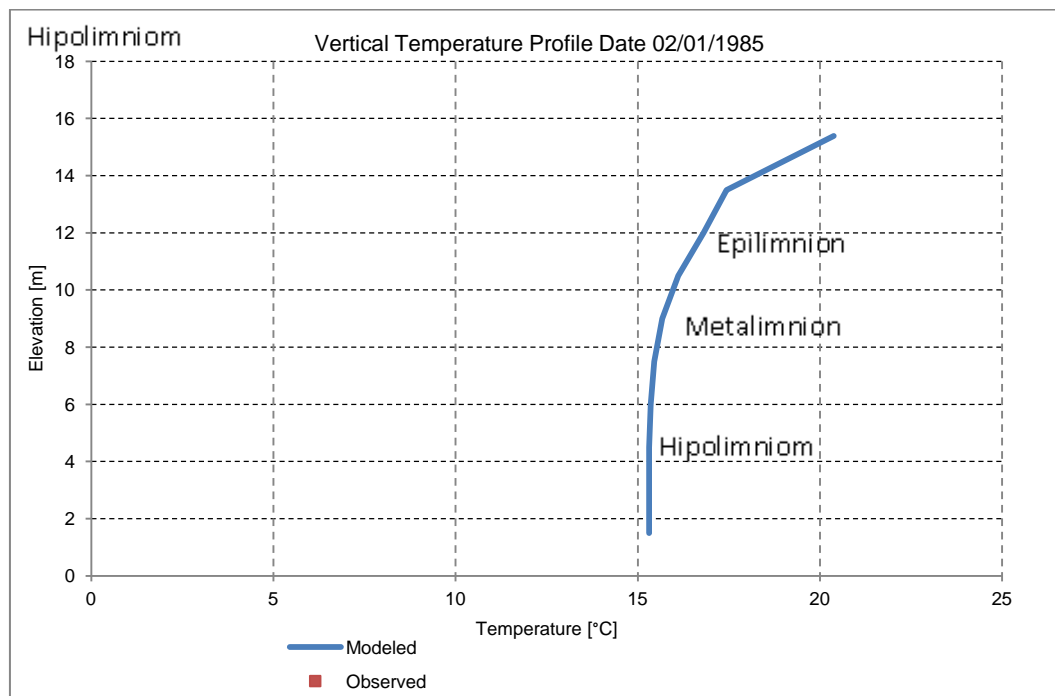
El hipolimnion presenta una temperatura de 14°C hasta una profundidad de 6 metros, el metalimnion presenta una caída exponencial de 1.3°C para profundidades de 6 a 8.5m llegando al epilimnion con una temperatura de 15.3°C constante para profundidades mayores a 8.5m.



**Figura 4-7 Perfil de temperatura escenarios Condición de frontera crítica (Caudal alto - Concentración mínima)**

En el caso de los últimos 5 escenarios de simulación es decir Condición de frontera crítica (Caudal bajo - Concentración máxima) en la Figura 4-8 se observa el hipolimnion presenta una temperatura de 15.3°C hasta una profundidad de 7.5 metros, el metalimnion presenta una caída exponencial de 1.2°C para profundidades de 7.5 a 10.5m llegando al epilimnion con una temperatura de 15.3°C para profundidades

mayores a 10.5m. No obstante, para este caso el epilimnion sigue aumentando la temperatura hasta un valor de 18°C con la profundidad.



**Figura 4-8 Perfil de temperatura escenarios Condición de frontera crítica (Caudal bajo - Concentración máxima)**

## 4.4 Conclusiones

En el presente capítulo se mostró la estimación del valor de la demanda béntica de oxígeno ejercida por los sedimentos existentes en el embalse del Muña con el modelo LAKE2K y la existencia de consumo de oxígeno debida a los sedimentos considerando el módulo de Benthos incorporado en MOHID. Los resultados para el caso de L2K demuestran que se presentan valores de demanda béntica pero muy cercana a cero para todos los distintos escenarios de saneamiento del agua del río Bogotá. Esto se debe a que las concentraciones de oxígeno en el embalse son cercanas a cero.

De manera particular, con el modelo MOHID se evidenció el agotamiento de oxígeno debido a los sedimentos en el fondo del embalse en el escenario de simulación en condición actual con caudales altos y concentraciones mínimas. Para los escenarios restantes de simulación se determinaron las condiciones anaerobias del embalse debido los valores cercanos a cero de oxígeno disuelto del afluente y el efluente.

Para el caso de LAKE2K, se evidencia que efectivamente existen valores de demanda béntica de oxígeno en el embalse, aunque estos son menores a  $1 \text{ gO}_2/\text{m}^2/\text{d}$  en todos los escenarios de simulación. Lo anterior se debe a que el consumo de oxígeno está restringido por las condiciones anaerobias que presenta el embalse.

Los valores medidos en el estudio “Definición y valorización técnica de alternativas de sectorización, operación y manejo y modelación hidrodinámica y de calidad del agua del embalse del Muña Fase III capítulo 2” desarrollado por EMGESA, EAAB, EEB y Uniandes, (2006) son mayores a los estimados a los valores estimados con el modelo LAKE2K en la presente tesis. Como consecuencia de esto y basándose en los valores típicos de demanda béntica en sedimentos [Chapra, 1997] mostrados en la Tabla 4-2 el tipo de lodo para los valores medidos es Lodo Fresco de Alcantarillado Municipal alrededor del desagüe y para los valores estimados con L2K demanda de oxígeno en el área hipolimnética -Lagos.

Por último, se observa que hay estratificación en el embalse para los diez escenarios de simulación modelados, es decir, se pueden diferenciar 3 capas de características bien definidas.

## **5. Análisis de los resultados de la simulación de escenarios en el Embalse**

### **5.1 Introducción**

En el presente capítulo se presentan los principales resultados hidrodinámicos y de calidad de agua obtenidos con los modelos COHERENS y MOHID así como la evaluación de la capacidad de asimilación de carga contaminante del embalse ayudando a definir el nivel de tratamiento requerido de las aguas residuales de la ciudad de Bogotá bajo diferentes escenarios de modelación.

En la primera parte del capítulo, se muestran los resultados arrojados por el modelo COHERENS la hidrodinámica y la calidad del agua que presenta el Embalse bajo diferentes escenarios de modelación.

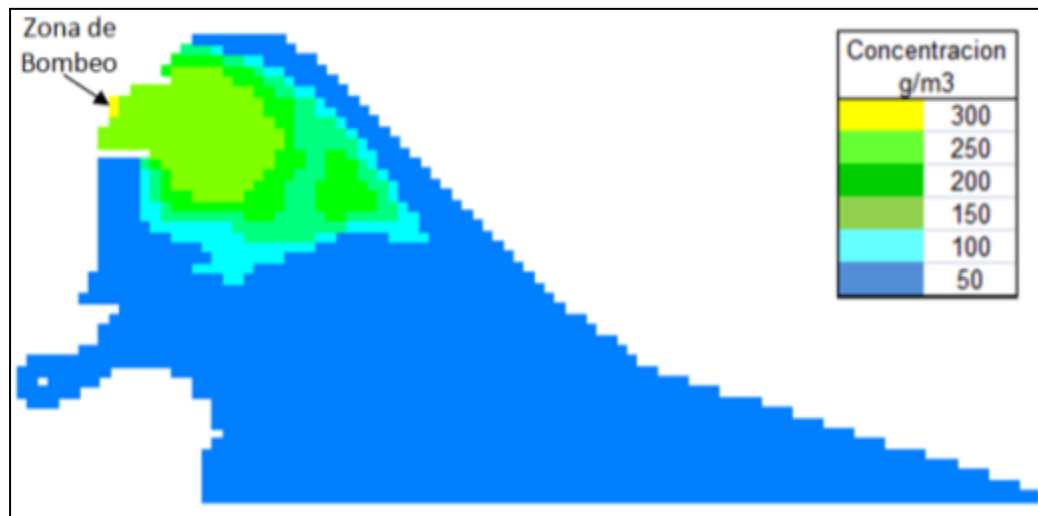
Posteriormente y de igual manera que para el modelo anterior, se presentan los resultados emitidos por MOHID y su evaluación, considerando la hidrodinámica en el embalse y la calidad del agua del efluente.

### **5.2 Análisis de resultados modelo COHERENS**

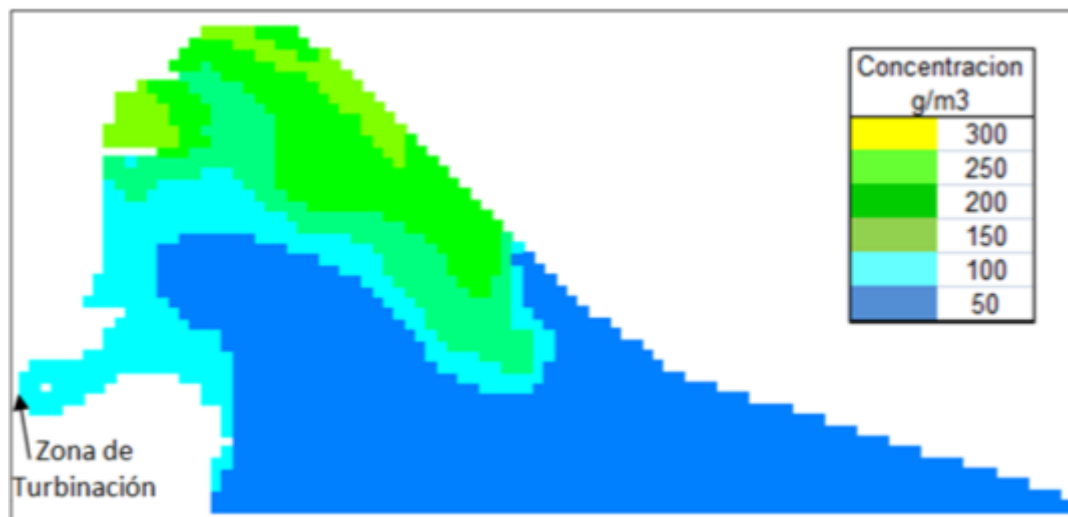
- Resultados de la modelación hidrodinámica

En primera instancia se pudo establecer claramente la influencia del viento en el nivel del agua y en la hidrodinámica del embalse. Para este caso y como se puede observar en la Figura 5-2, la concentración del contaminante se mueve en la dirección predominante del viento para las primeras horas de modelación (dirección sureste).



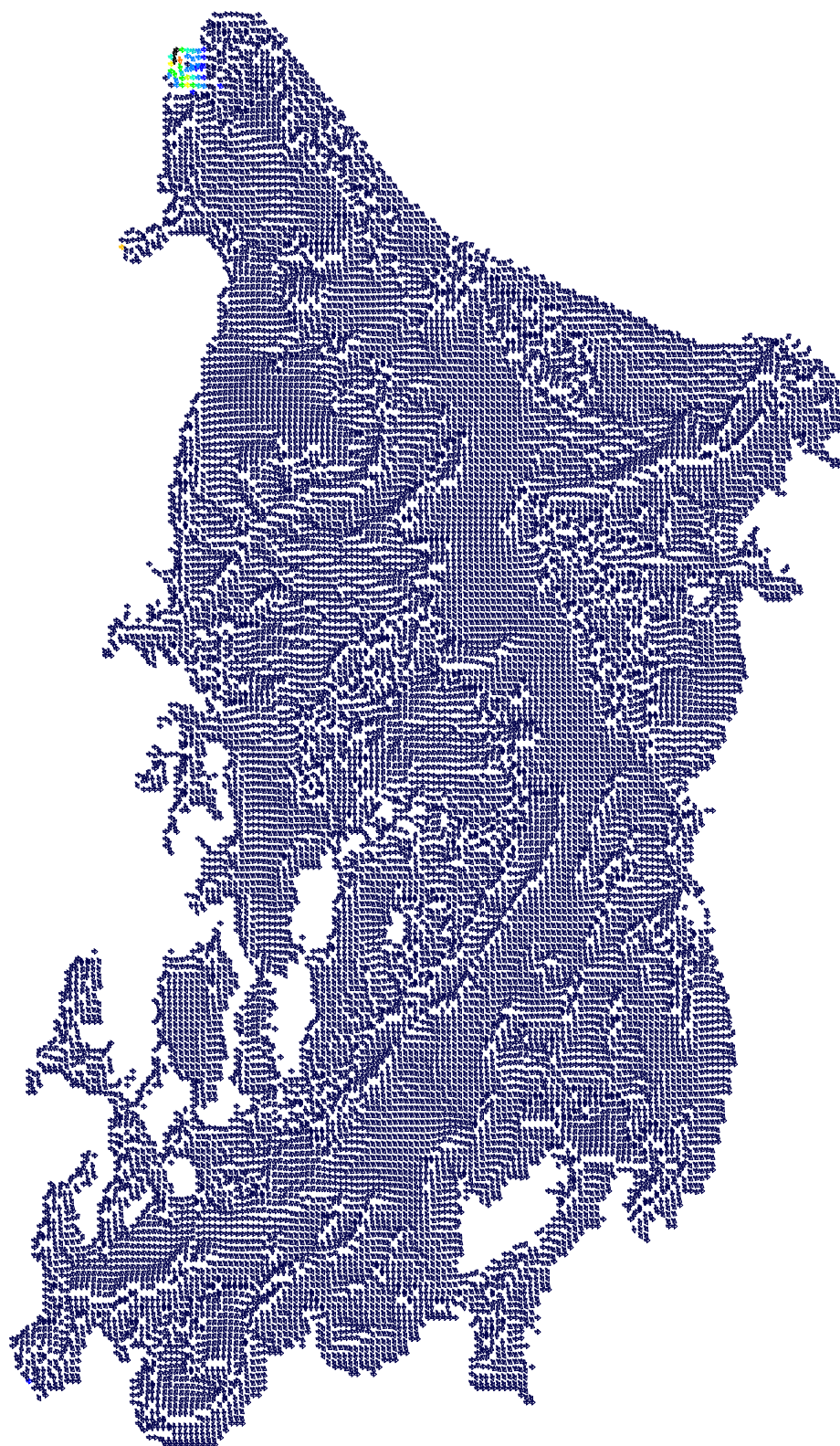


**Figura 5-1 Distribución espacial de la concentración de un contaminante (hora 7)**

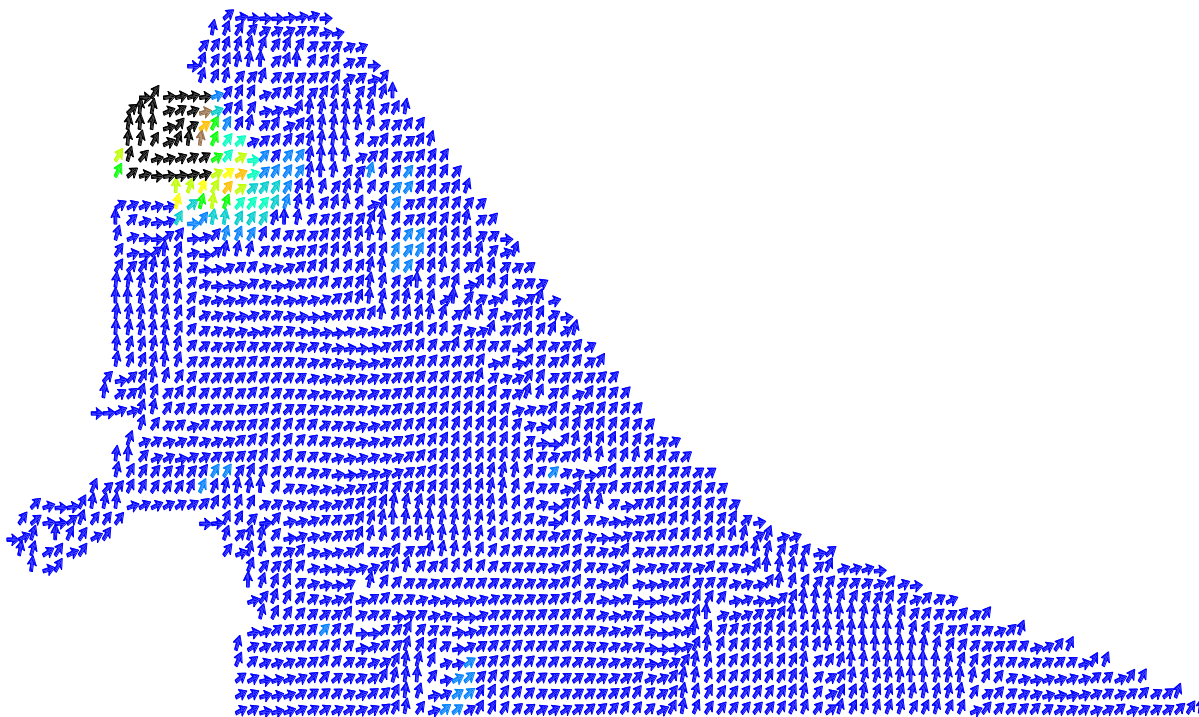


**Figura 5-2 Distribución espacial de la concentración de un contaminante (hora 53)**

También se observa (Figura 5-3 y Figura 5-4) que los movimientos de agua con mayor velocidad se presentan muy cerca de la entrada en horas de bombeo, el resto del cuerpo de agua se mueve a menor velocidad. Los vectores de velocidad iniciales se presentan en color azul, las zonas que tienen color más oscuro o diferente son aquellas donde hay mayor movimiento de agua.



**Figura 5-3 Vectores de velocidad en el Embalse (registro horario de bombeo)**



**Figura 5-4 Vectores de velocidad en el Embalse zona superior (registro horario de bombeo)**

- Resultados de la modelación de los determinantes de calidad de agua

Teniendo en cuenta las limitaciones del programa COHERENS y los cambios mencionados anteriormente hechos al programa, se modeló durante 720 horas (tiempo del programa) para 2 contaminantes conservativos (el modelo cuenta con un módulo de máximo de 9 contaminantes el cual no especifica el tipo de contaminante) y para 3 parámetros del módulo biológico.

Los determinantes que se modelaron fueron los siguientes:

- P2M  $\text{mmol N m}^{-3}$  = Nitrógeno orgánico
- P2NHS  $\text{mmol N m}^{-3}$  = Amoníaco
- P2O  $\text{mmol O m}^{-3}$  = Oxígeno disuelto
- CONC  $(\text{g/m}^3)$  = Contaminante 1
- CONC2  $(\text{g/m}^3)$  = Contaminante 2

Cabe notar que las unidades utilizadas por COHERENS están dadas en  $\text{mmol/m}^3$  para los determinantes del módulo biológico, por esta razón y sabiendo que los pesos

atómicos del carbono, nitrógeno y oxígeno son 12,14 y 16 respectivamente, se tiene para cada determinante un factor de conversión de:

$$\frac{\text{mg}}{\text{lt}} * \frac{1000\text{lt}}{1\text{m}^3} * \frac{1\text{gr}}{1000\text{mg}} * \frac{1\text{mol}}{14\text{gr N}} * \frac{1000\text{mmolN}}{1\text{mol}} = 71.42 \frac{\text{P2M mmol N}}{\text{m}^3} \quad (36)$$

$$\frac{\text{mg}}{\text{lt}} * \frac{1000\text{lt}}{1\text{m}^3} * \frac{1\text{gr}}{1000\text{mg}} * \frac{1\text{mol}}{14\text{gr N}} * \frac{1000\text{mmolN}}{1\text{mol}} = 71.42 \frac{\text{P2NH5mmol N}}{\text{m}^3} \quad (37)$$

$$\frac{\text{mg}}{\text{lt}} * \frac{1000\text{lt}}{1\text{m}^3} * \frac{1\text{gr}}{1000\text{mg}} * \frac{1\text{mol}}{16\text{gr O}} * \frac{1000\text{mmolN}}{1\text{mol}} = 62.5 \frac{\text{P2Ommol O}}{\text{m}^3} \quad (38)$$

Los datos de las concentraciones que inicializan el modelo en unidades de mg/l son:

**Tabla 5-1** Concentraciones iniciales del modelo

Datos iniciales en el modelo	(g/m <sup>3</sup> )	(mmol/m <sup>3</sup> )
P2M (Nitrógeno Orgánico)	6.51	464.9
P2NHS (Nitrógeno amoniacal)	9.37	669.2
P2O (Oxígeno disuelto)	1.3	81.25
CONC Contaminante 1	50	-
CONC2 Contaminante 2	50	-

Los valores de entrada de los determinantes de calidad del agua de los 10 escenarios al modelo fueron facilitados a partir de los resultados obtenidos en el desarrollo del proyecto "*Modelación dinámica de la calidad del agua del Río Bogotá*". [UNAL-EAAB, 2011].

Como se mencionó anteriormente para el programa COHERENS no se logró la entrada de series de tiempo de determinantes de calidad de agua para el *módulo biológico*, del modelo. Por esta razón se calculó la concentración media de todos los determinantes de calidad de agua con entrada constante.

Los valores de las concentraciones medias para los determinantes modelados en COHERENS son los siguientes para cada uno de los escenarios anteriormente mencionados:

**Tabla 5-2** Datos de concentración de entrada al Embalse

	NO (g/m <sup>3</sup> )	NO (mmol/m <sup>3</sup> )	NH <sub>4</sub> (g/m <sup>3</sup> )	NH <sub>4</sub> (mmol/ m <sup>3</sup> )	OD (g/m <sup>3</sup> )	OD (mmol/m <sup>3</sup> )	CONC (g/m <sup>3</sup> )	CONC2 (g/m <sup>3</sup> )
<b>Escenarios de simulación con Caudales altos concentraciones mínimas</b>	1.2	84.99	14.29	1020.6	0.2	12.5	100	300
<b>Escenario de simulación en condición actual Caudales bajos concentraciones máximas</b>	3.37	240.69	30.99	2213.3	1.47	91.88	100	300
<b>Escenarios de simulación restantes Caudales bajos concentraciones máximas</b>	3.37	240.69	30.99	2213.3	0.2	12.5	100	300

A continuación se muestran las cargas contaminantes medias (Ton/día) del afluente y el efluente, además del porcentaje de remoción presente en el embalse según los resultados arrojados por el modelo COHERENS para los escenarios de simulaciones descritos en la sección 3.5.

En la Tabla 5-3, se presentan los resultados para los cinco primeros escenarios de simulación en Condición de frontera crítica (Caudal bajo- Concentración máxima). Se muestra que los porcentajes de remoción se encuentran entre un 12 y un 34%. De manera particular, se observa que las cargas de oxígeno disuelto a la entrada y salida del embalse se mantienen en niveles entre 0.3 y 0.002 (Ton/día) respectivamente, lo anterior se debe a la alta contaminación de las aguas bombeadas del río Bogotá indicando condiciones anaerobias en el embalse tal como se concluyó en el capítulo 4. Para el caso del nitrógeno orgánico y el nitrógeno amoniacal se el valor de porcentaje de remoción indica procesos de amonificación y nitrificación en el embalse respectivamente. Por último, existe remoción de la carga de los contaminantes 1 y 2 del modulo de COHERENS, no obstante, son los valores con menor porcentaje y se observa que son los mismos independiente del escenario modelado. Esto se debe a que el modelo no especifica qué tipo de contaminante es y que procesos están ligados con los otros determinantes de calidad de agua generando únicamente la distribución del mismo en el embalse.

**Tabla 5-3** Resultados obtenidos modelo COHERENS. Escenario en Condición de frontera crítica (Caudal bajo- Concentración máxima)

<b>Determinante</b>	<b>Afluente (Ton/día)</b>	<b>Efluente (Ton/día)</b>	<b>% Remoción</b>
P2M (Nitrógeno orgánico)	1.81	1.19	34
P2NHS (Nitrógeno amoniacal)	21.61	18.17	16
P2O (Oxígeno disuelto)	0.3	0.002	-
CONC Contaminante 1	151.2	132.66	12
CONC2 Contaminante 2	453.6	361.01	20

En la Tabla 5-4, los resultados para el escenario de simulación en condición de frontera crítica (Caudal bajo – Concentración máxima) “condición actual” presenta valores de remoción se encuentran entre un 12 y un 35%. El valor del oxígeno disuelto es mayor en el afluente que los demás escenarios, pero de igual manera se nota un agotamiento casi total de este determinante de calidad de agua. Esto indica procesos de descomposición de la materia orgánica de los sedimentos y oxidación de amoníaco. Se presentan procesos de amonificación y nitrificación en el embalse generando la remoción de la carga de los determinantes nitrógeno amoniacal y nitrógeno orgánico.

**Tabla 5-4** Resultados obtenidos modelo COHERENS Escenario en Condición de frontera crítica (Caudal alto- Concentración mínima) “condición actual”

<b>Determinante</b>	<b>Afluente (Ton/día)</b>	<b>Efluente (Ton/día)</b>	<b>% Remoción</b>
P2M (Nitrógeno orgánico)	5.1	3.33	35
P2NHS (Nitrógeno amoniacal)	46.86	35.56	24
P2O (Oxígeno disuelto)	2.22	0.002	-
CONC Contaminante 1	151.2	132.68	12
CONC2 Contaminante 2	453.6	361.02	20

Finalmente, en la Tabla 5-5, se presentan los resultados de los escenarios de simulación Condición de frontera crítica (Caudal bajo – Concentración máxima) “escenarios restantes” los valores de porcentaje de remoción son muy similares a los mencionados

en el caso anterior como era de esperarse, ya que los valores promedios de las cargas del afluente son las mismas exceptuando las cargas de oxígeno disuelto que confirman las condiciones anaerobias presentes en la represa del Muña.

**Tabla 5-5** Resultados obtenidos modelo COHERENS Escenario en Condición de frontera crítica (Caudal alto- Concentración mínima) “escenarios restantes”

<b>Determinante</b>	<b>Afluente (Ton/día)</b>	<b>Efluente (Ton/día)</b>	<b>% Remoción</b>
P2M (Nitrógeno orgánico)	5.1	3.33	35
P2NHS (Nitrógeno amoniacal)	46.86	36.14	23
P2O (Oxígeno disuelto)	0.3	0.002	-
CONC Contaminante 1	151.2	132.68	12
CONC2 Contaminante 2	453.6	361.02	20

En general, los resultados del análisis de calidad de agua para los escenarios modelados presentan un comportamiento similar mostrando que el embalse está en capacidad de degradar los contaminantes. Los anteriores resultados se mencionan bajo la limitación de la modelación de otros importantes determinantes de calidad de agua como el ciclo del fósforo, los coliformes totales, los sólidos suspendidos etc. con entrada al modelo de series de tiempo.

### 5.3 Análisis de resultados modelo MOHID

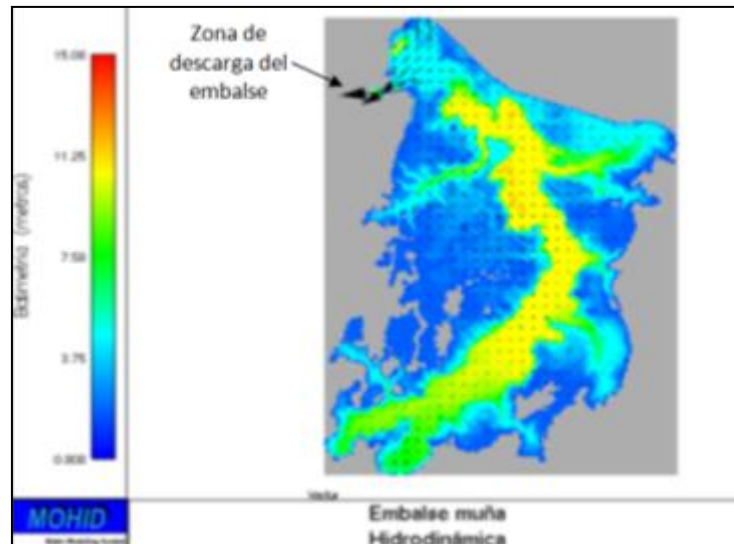
Posteriormente a la prueba de series sintéticas, se corrió el modelo MOHID para un tiempo de simulación de 720 horas. En esta parte del capítulo se hace un análisis detallado de los resultados obtenidos.

- Resultados de la modelación hidrodinámica

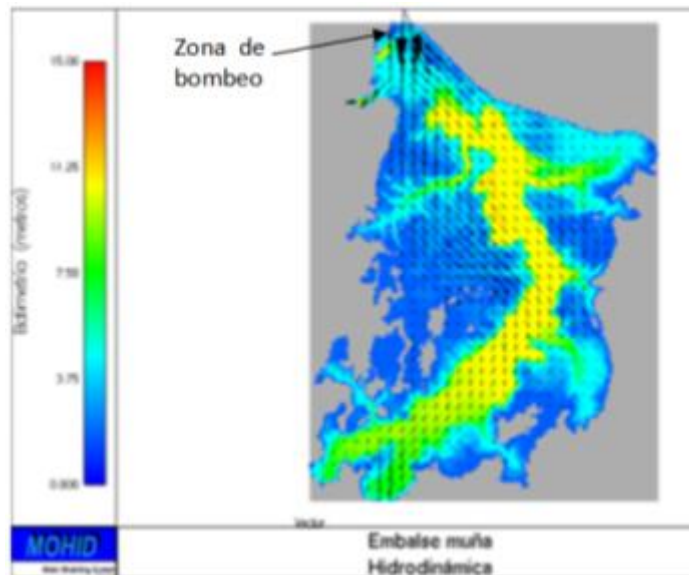
Como se observa en la Figura 5-8, MOHID muestra la influencia del viento en el nivel del agua en el embalse siendo mayor nivel del agua en dirección predominante del viento (Sureste). Además se puede observar que los movimientos de agua con vectores de mayor magnitud se presentan muy cerca a la entrada y salida del embalse dependiendo de la hora de simulación tal como se muestra en la Figura 5-5 y Figura 5-6. El resto del cuerpo de agua presenta una menor magnitud en los vectores, mostrando que el resto



del cuerpo de agua se mueve a menor velocidad como se indicó con el modelo anterior. Destacándose como mayores las velocidades las zonas de bombeo y turbinación del Embalse.



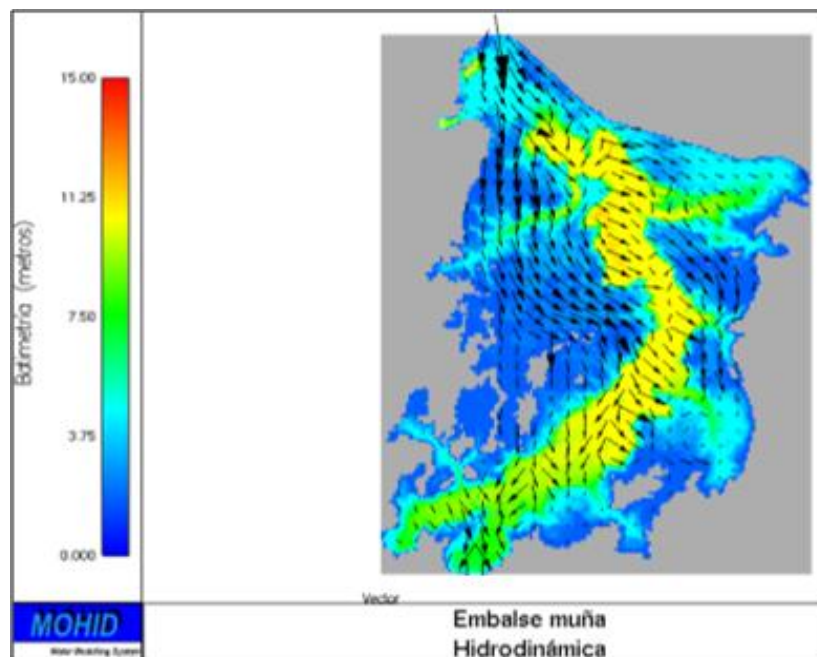
**Figura 5-5 Vectores con magnitud mayor en la zona de descarga**



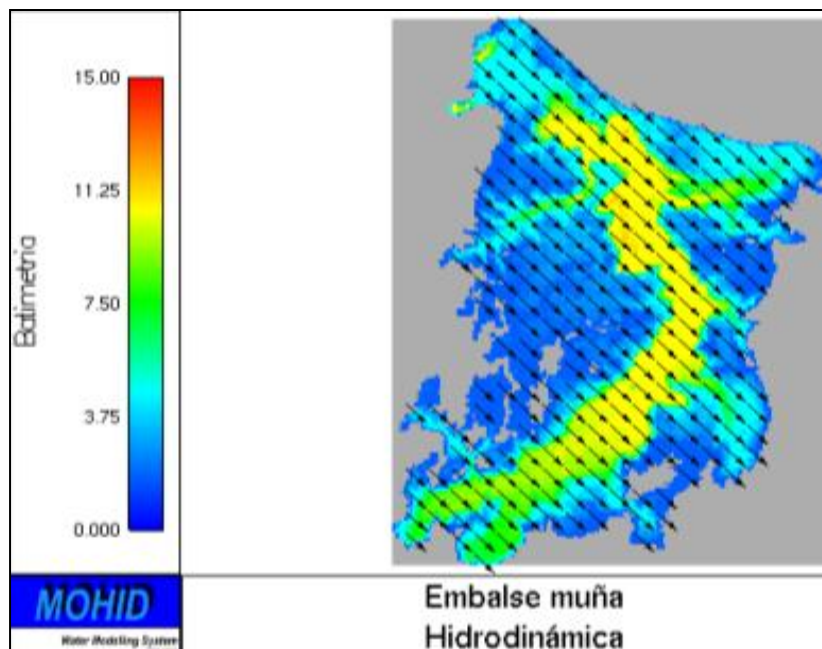
**Figura 5-6 Vectores con magnitud mayor en la zona de bombeo**

Se observa también las direcciones predominantes del flujo (Figura 5-7) y la velocidad predominante del viento en el embalse (Figura 5-8).





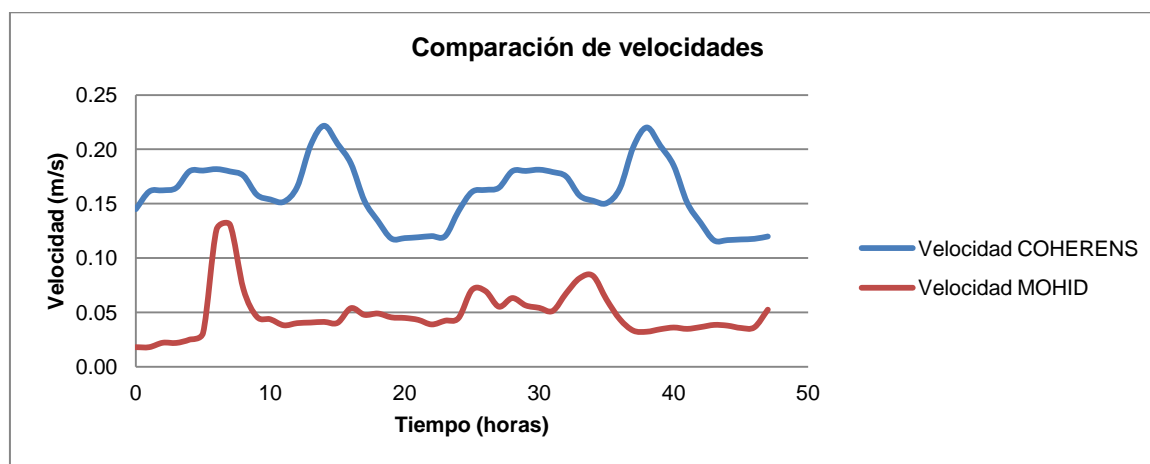
**Figura 5-7 Dirección del flujo en el Embalse**



**Figura 5-8 Dirección predominante del viento en el Embalse**

Los resultados obtenidos con el modelo COHERENS en la sección 5.2 (Resultados de la modelación hidrodinámica) con los inmediatamente mostrados, señalan que el embalse presenta el mismo comportamiento para los dos modelos utilizados.

En la Figura 5-9 se presenta una comparación de los valores de la magnitud de las velocidades en la zona de descarga del embalse (Torre Granada) arrojados por los modelos COHERENS y MOHID. Se observa un comportamiento similar en la magnitud de las velocidades para ambos modelos corroborando lo anteriormente dicho, no obstante, los valores de la velocidad son mayores para COHERENS con valores máximos y mínimos de 0.23m/s y 0.12m/s respectivamente. Para el caso de MOHID los valores extremos de velocidad se encuentran entre 0.03 y 0.13 m/s.



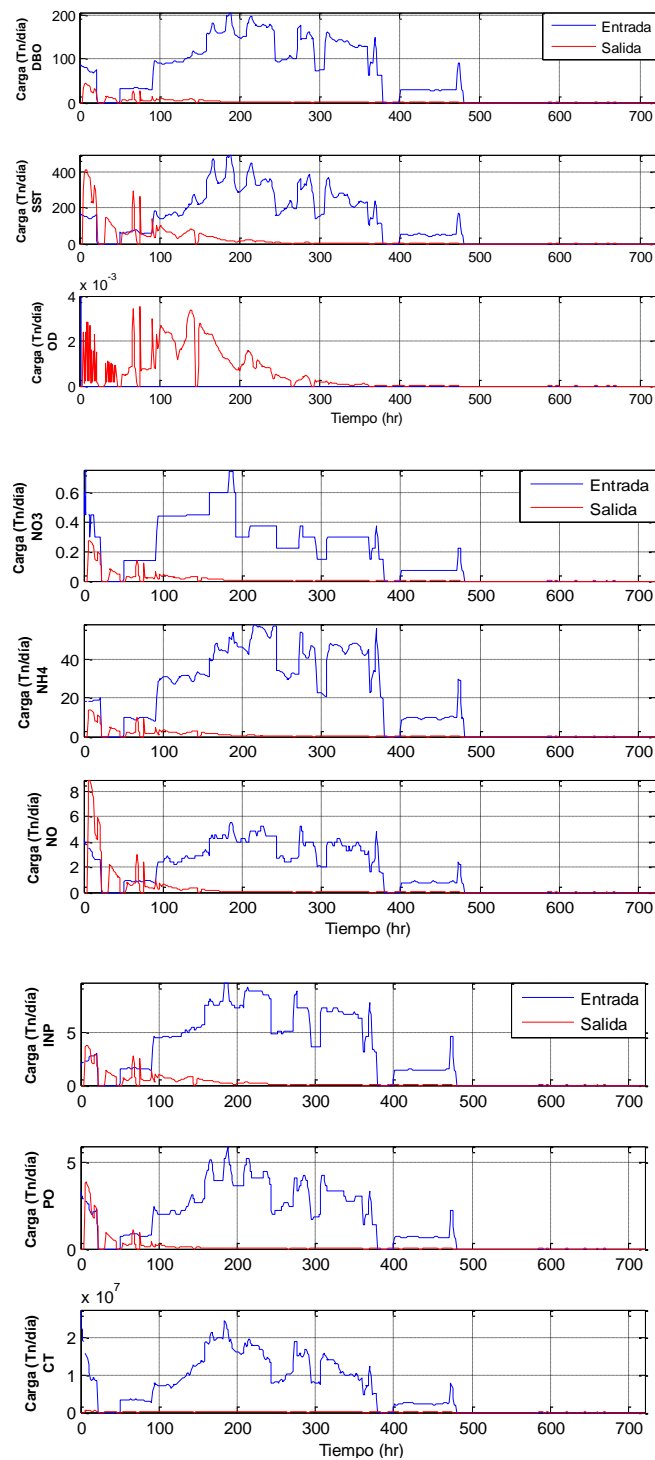
**Figura 5-9 Comparación de velocidades modelos COHERENS y MOHID**

#### ▪ Resultados de calidad de agua

Los resultados de calidad de agua obtenidos con el modelo MOHID muestran gráficamente la carga contaminante (Ton/día) de cada determinante de calidad de agua en cada escenario de simulación a la entrada y salida del embalse. Para esto se realizó y utilizó un programa en el software matemático MATLAB, el cual lee los datos automáticamente desde Excel y grafica los resultados en 3 subgráficas, cada una de ellas con 3 determinantes de calidad de agua (ANEXO B).

Los resultados para los cinco primeros escenarios de simulación se muestran en la Figura 5-10.

### Escenarios de simulación en condiciones críticas con caudales altos y concentraciones mínimas

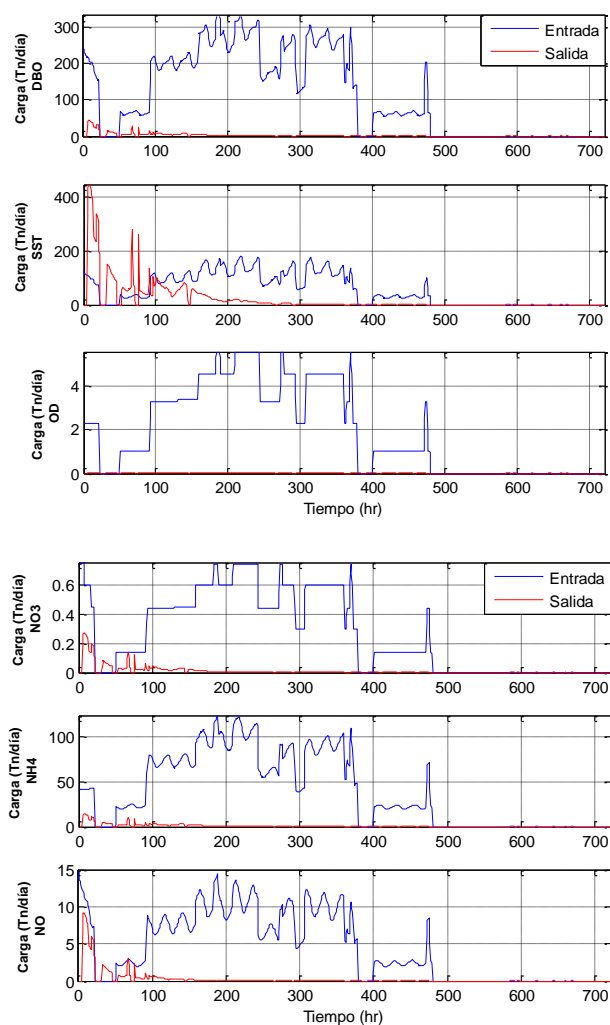


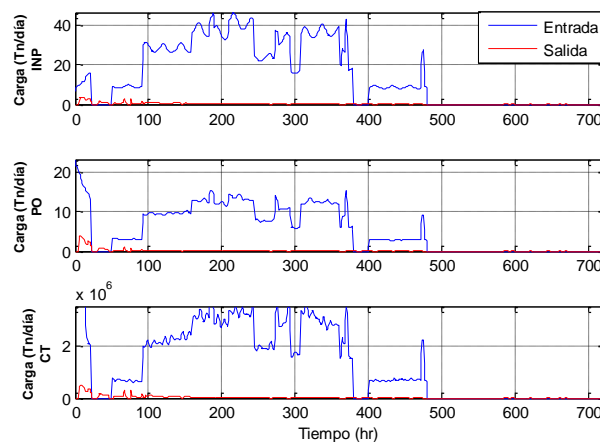
**Figura 5-10 Cargas de entrada y salida escenarios en condición de frontera crítica (Caudal alto - Concentración mínima)**

Gráficamente se puede evidenciar que existe una remoción alta de la carga contaminante de las aguas que ingresan al embalse para todos los determinantes de calidad modelados excepto para el oxígeno disuelto donde se observa que los valores de las cargas se encuentran entre 0.002 (Ton/día) en el afluente y efluente.

En la Figura 5-11, los resultados para el caso de Condición de frontera crítica (Caudal bajo- Concentración máxima) “condición actual”.

**Escenario de simulación Condición de frontera crítica (Caudal bajo- Concentración máxima) “condición actual”**



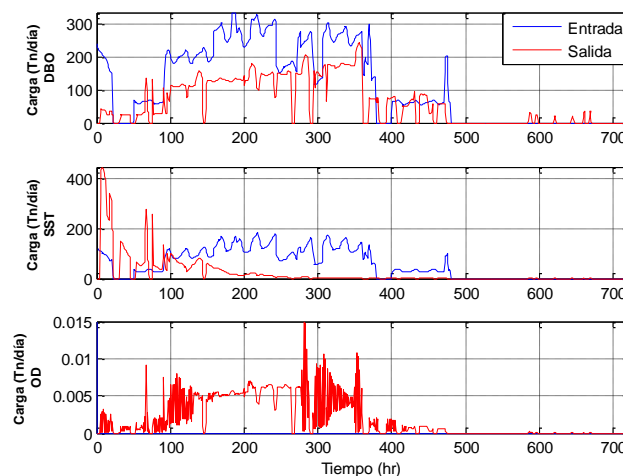


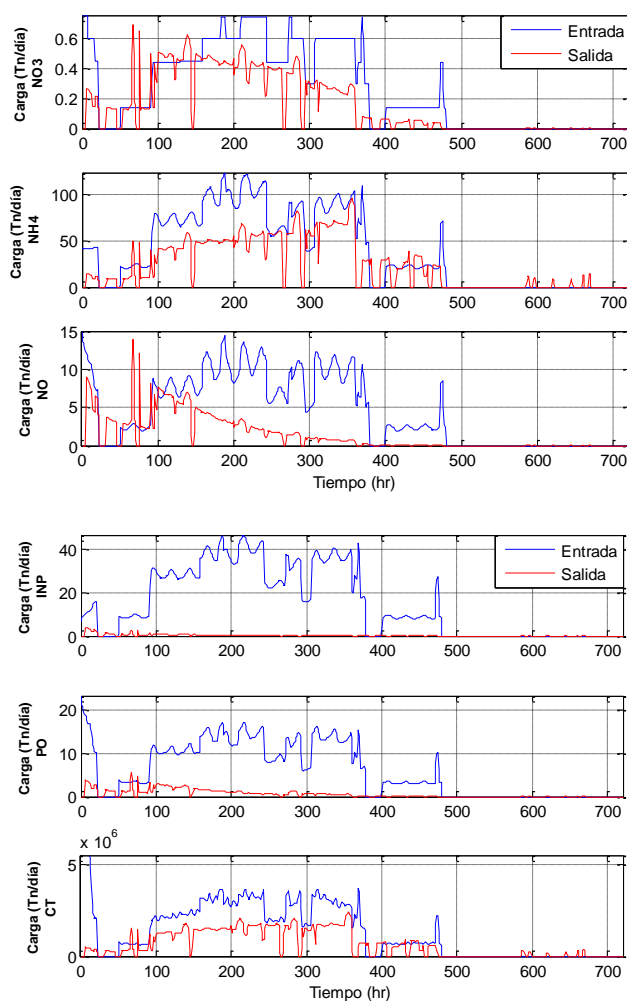
**Figura 5-11 Cargas de entrada y salida escenario de simulación en Condición de frontera crítica (Caudal bajo – Concentración máxima) “condición actual”**

De igual manera que para el caso anterior se puede evidenciar que existe una remoción alta de la carga contaminante de las aguas que ingresan al embalse para todos los determinantes de calidad modelados. En particular se observa que aunque el afluente presenta valores de oxígeno disuelto este se consume debido a los diferentes procesos biológicos explicados anteriormente.

Por último, en la Figura 5-12, los resultados para los cuatro escenarios restantes en condición de frontera crítica (Caudal bajo – Concentración máxima) “escenarios restantes”

**Escenarios de simulación condición de frontera crítica (Caudal bajo – Concentración máxima) “escenarios restantes”**





**Figura 5-12 Cargas de entrada y salida escenarios de simulación Condición de frontera crítica (Caudal bajo – Concentración máxima) “escenarios restantes”**

Se evidencia el mismo comportamiento descrito anteriormente el cual muestra remoción en los determinantes de calidad del agua modelados. Comparando los valores de oxígeno disuelto del afluente del escenario inmediatamente anterior con los valores de oxígeno de los escenarios restantes se observa

En general, gráficamente se puede observar que existe una remoción muy alta de la carga contaminante de las aguas que ingresan al embalse para todos los determinantes de calidad modelados.

Con el fin de cuantificar el porcentaje de remoción en el embalse, se consideró un valor promedio de concentración a la entrada y a la salida del embalse para cada uno de los determinantes de calidad del agua (Tabla 5-6).

**Tabla 5-6** Valores promedio de carga a la entrada del embalse (Ton/día)

	SST	CT	DBO	NO	NO3	NH4	INP	PO	OD
<b>Escenarios de simulación con Caudales altos concentraciones mínimas</b>	127.31	6293143.22	66.24	1.81	0.20	21.61	1.59	3.27	0.30
<b>Escenario de simulación en condición actual Caudales bajos concentraciones máximas</b>	65.05	1594337.94	134.55	5.10	0.32	46.86	6.64	18.40	2.22
<b>Escenarios de simulación restantes Caudales bajos concentraciones máximas</b>	65.05	1594337.94	134.55	5.10	0.32	46.86	7.18	18.40	0.30

Posterior a la modelación realizada con el programa MOHID a continuación se muestran los resultados obtenidos de las cargas de contaminantes en el efluente y el porcentaje de remoción promedio en el embalse del Muña.

En la Tabla 5-7 para los escenarios en condición de frontera crítica y condición hidrológica húmeda y concentración mínima existe un porcentaje de remoción de carga contaminante en todos los determinantes de calidad del agua. Para el caso del nitrógeno orgánico el valor del porcentaje de remoción es del 69% siendo las cargas en el afluente y efluente de 1.8 y 0.56(Ton/día) respectivamente. Este porcentaje es el menor reportado de todos los determinantes modelados, no obstante, se evidencian procesos de hidrólisis (amonificación) en el que el nitrógeno orgánico se convierte en amoníaco. A su vez, el porcentaje de remoción del amoníaco es del 94% siendo uno de los más altos con cargas de 21.62(Ton/día) en el afluente y 1.29(Ton/día) en el efluente. Esta remoción se presenta debido a cargas directas y a la descomposición del nitrógeno orgánico el cual se oxida en dos procesos para formar nitritos y nitratos. Este proceso y el agotamiento ejercido por los sedimentos consumen oxígeno y por lo tanto se puede reducir

seriamente los niveles en el embalse, además siendo los valores de cargas del oxígeno disuelto de 0.30 (Ton/día) en el bombeo y de 0.002 (Ton/día) en la descarga del embalse hacia el Río Bogotá se confirman las condiciones anaerobias del embalse.

Una de las sustancias que están altamente ligadas al proceso de eutroficación es el fósforo. En general el uso de detergentes fosfatados tienen un gran impacto en la cantidad fósforo en las aguas residuales [Chapra, 1997]. La caracterización fisicoquímica realizada por EMGESA y Uniandes en 1998 mostró que las concentraciones de fósforo evidencian la eutroficación del embalse equivalentes a aguas residuales domésticas. Para el caso del fósforo orgánico e inorgánico, existen porcentajes de remoción del 99% y del 78%, esto implica que el embalse del Muña tiene una acumulación neta de fósforo debido a los sedimentos existentes los cuales son un gran reservorio de fósforo en el embalse.

La carga de coliformes totales disminuye considerablemente al pasar por el embalse siendo el valor del porcentaje de remoción del 99% para los cinco primeros escenarios modelados. Considerando que ya no existe presencia de buchón de agua en la superficie del embalse y que la radicación solar es el factor con mayor relevancia en el decaimiento de la concentración de los patógenos, se muestra una gran capacidad de auto depuración de coliformes totales.

De igual manera que los demás determinantes de calidad del agua mencionados anteriormente se demuestra la capacidad del embalse para remover la carga contaminante de sólidos suspendidos totales con una remoción del 70% siendo las cargas de entrada y de salida de 127.3(Ton/día) y 37.97(Ton/día) respectivamente.

Finalmente se aprecia un porcentaje de remoción de DBO del 94% en el embalse con valores de 66.24(Ton/día) a la entrada del embalse y 3.75(Ton/día) a la salida reduciendo la cantidad de oxígeno que necesitan los microorganismos para degradar la materia orgánica biodegradable existente en el embalse.

Comparando los resultados obtenidos de la modelación realizada con MOHID y COHERENS para los primeros cinco escenarios de simulación se observa que los valores de los porcentajes de remoción son mayores para el primer modelo mencionado. Esta diferencia se debe a las limitaciones de la no implementación de series de tiempo y



de la falta de modelación de otros determinantes importantes de calidad del agua con el programa COHERENS.

**Tabla 5-7** Resultados obtenidos modelo MOHID Condición de frontera crítica  
(Caudales altos - Concentraciones mínimas)

<b>Determinante</b>	<b>Afluente (Ton/día)</b>	<b>Efluente (Ton/día)</b>	<b>% Remoción</b>
Demanda biológica de oxígeno	66.24	3.75	94
Sólidos suspendidos totales	127.31	37.97	70
Oxígeno disuelto	0.30	0.002	-
Nitratos	0.20	0.02	89
Nitrógeno amoniacal	21.61	1.29	94
Nitrógeno orgánico	1.81	0.56	69
Fósforo inorgánico	1.59	0.35	78
Fósforo orgánico	3.27	0.23	99
Coliformes totales	6293143.22	42125.53	99

Para el caso del escenario con frontera crítica, condición hidrológica seca y de concentración de determinantes de calidad de agua máximas “condición actual”, se observan valores de porcentajes de remoción (Tabla 5-8) entre 89% y 99% excepto para el determinante de sólidos suspendidos totales el cual muestra una remoción del 44%. Estos porcentajes de remoción son debidos a los procesos biológicos descritos anteriormente para cada determinante. En particular, se observa que el afluente presenta un valor de oxígeno disuelto de 2.22(Ton/día), no obstante el valor de la carga de oxígeno del efluente es de 0.002(Ton/día) un agotamiento casi total de oxígeno, sin embargo, los valores de remoción de carga contaminante tan elevados indican un mejoramiento en la calidad del agua en el embalse y a la salida del mismo.

De igual manera que para los cinco primeros escenarios de modelación los porcentajes de remoción son menores en COHERENS que MOHID para los cinco escenarios en condición de frontera crítica (Caudal bajo – Concentración máxima), esto se debe a las limitaciones anteriormente mencionadas para el caso de COHERENS.

**Tabla 5-8** Resultados obtenidos modelo MOHID Condición de frontera crítica  
(Caudal bajo – Concentración máxima) “condición actual”

<b>Determinante</b>	<b>Afluente (Ton/día)</b>	<b>Efluente (Ton/día)</b>	<b>% Remoción</b>
Demanda biológica de oxígeno	134.55	3.73	97
Sólidos suspendidos totales	65.05	38.60	41
Oxígeno disuelto	2.22	0.002	-
Nitratos	0.32	0.02	93
Nitrógeno amoniacal	46.86	1.28	97
Nitrógeno orgánico	5.10	0.57	89
Fósforo inorgánico	6.64	0.35	95
Fósforo orgánico	18.40	0.23	99
Coliformes totales	1594337.94	42231.67	98

Para los cuatro escenarios restantes en Condición de frontera crítica (Caudal bajo – Concentración máxima) se observa en la Tabla 5-9 porcentajes de remoción menores a los reportados en el escenario anterior bajo las mismas condiciones de simulación. Para el fósforo orgánico e inorgánico valores de remoción son de un 96% y 95% respectivamente siendo los mayores reportados. Los nitratos, el nitrógeno orgánico y amoniacal presentan remociones de 42, 66 y 35% respectivamente, la DBO 41% al igual que los sólidos suspendidos totales y los coliformes totales un porcentaje de remoción del 43. Para el caso del oxígeno los valores de de carga en el afluente y el efluente señalan la condición anaerobia del embalse.

Se puede evidenciar que bajo las condición de frontera crítica (Caudal bajo – Concentración máxima) existe una mayor remoción en la carga contaminante de todos los determinantes de calidad del agua en “condición actual” (Tabla 5-8) que para los cuatro escenarios restantes (PTAR Salitre con tratamiento secundario (TS) y PTAR Canoas con tratamiento primario (TP), PTAR Salitre TS y PTAR Canoas TS (con desinfección en ambas plantas), PTAR Salitre TS y PTAR Canoas con mitad TS ( $7 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y mitad sin tratamiento ( $7 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y PTAR Salitre TS y PTAR Canoas con mitad TS ( $7 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y mitad TP ( $7 \text{ m}^3/\text{s}$ )) (Tabla 5-9) indicando que el primer escenario sería el seleccionado para escoger el nivel de tratamiento de las aguas de río Bogotá.

**Tabla 5-9** Resultados obtenidos modelo MOHID Condición de frontera crítica  
(Caudal bajo – Concentración máxima) “escenarios restantes”

<b>Determinante</b>	<b>Afluente (Ton/día)</b>	<b>Efluente (Ton/día)</b>	<b>% Remoción</b>
Demanda biológica de oxígeno	134.5	79.97	41
Sólidos suspendidos totales	65.04	38.60	41
Oxígeno disuelto	0.30	0.005	-
Nitratos	0.31	0.18	42
Nitrógeno amoniacal	46.85	30.51	35
Nitrógeno orgánico	5.09	1.71	66
Fósforo inorgánico	7.18	0.35	95
Fósforo orgánico	18.40	0.67	96
Coliformes totales	1594337.94	906313.10	43

Según las tablas y graficas anteriores, en general se muestra que el embalse está en capacidad de degradar los contaminantes, esto para todos los escenarios de simulación. A continuación se comparan los valores obtenidos con la literatura.

Particularmente, considerando que ya no existe presencia de buchón de agua en la superficie del embalse y que la radicación solar es el factor con mayor relevancia en el decaimiento de la concentración de los patógenos, se muestra una gran capacidad de auto depuración de coliformes totales. En la Tabla 5-10 se muestra en resumen las concentraciones estándar para diferentes usos de agua.

**Tabla 5-10** Concentraciones estándar para coliformes totales y fecales [Chapra, 1997]

<b>Uso</b>	<b>Coliformes Totales (NMP / 100 mL)</b>	<b>Coliformes Fecales (NMP / 100 mL)</b>
<b>Agua para consumo humano</b>	0	0
<b>Mariscos</b>	70	14
<b>Pesca</b>	1000-5000	100-1000
<b>Uso recreativo</b>	1000-5000	100-1000

Como se observa en los resultados obtenidos por el modelo MOHID los valores de coliformes totales a la entrada y salida del embalse para los escenarios modelados son muy altos comparados con los dados en la Tabla 5-10, por esta razón se concluye que cualquier uso del agua del embalse se ve restringido.

La remoción de sólidos suspendidos totales para los escenarios mencionados señala que el embalse posee una notable capacidad de asimilación de carga contaminante. El valor obtenido de  $25.11\text{g/m}^3$  para los primeros cinco escenarios y de  $25.52\text{g/m}^3$  para los últimos cinco comparados con valores reportados en la literatura está dentro del rango normal siendo aguas extremadamente limpias valores por debajo de  $1\text{g/m}^3$  y sistemas altamente turbios para valores por encima de  $100\text{g/m}^3$  [Chapra, 1997]. En la Tabla 5-11 se muestran las concentraciones de sólidos suspendidos totales encontrados en aguas naturales y aguas residuales.

**Tabla 5-11** Concentraciones de sólidos suspendidos totales encontrados en aguas naturales y aguas residuales [Chapra, 1997]

Sistema	Sólidos suspendidos (mg/l)
Grandes lagos: Superior/Huron Saginaw Bay Lago Western Erie	0.5 8.0 20.0
Río Flint, Michigan	8-12
Rápidos Crees, South Dakota	158
Río Clinton, Michigan	10-120
Río Hudson, NY	10-60
Estuario Potomac	5-30
Estuario James, Virginia	10-50
Sacramento-San Joaquín Delta, California	50-175
Aguas residuales sin tratar	300

## 5.4 Conclusiones

En el presente capítulo se han presentado los principales resultados obtenidos de la modelación hidrodinámica y de calidad de agua del embalse del Muña realizada con los modelos COHERENS y MOHID, así como la evidente capacidad de asimilación de carga

contaminante ayudando a definir el nivel de tratamiento requerido de las aguas residuales de la ciudad de Bogotá bajo diferentes escenarios de modelación.

Los resultados de la calidad del agua a la salida del embalse arrojados por COHERENS para los escenarios de simulación muestran porcentajes de remoción más bajos que los reportados por MOHID, esto se debe a que la versión presentada de COHERENS presenta algunas deficiencias en la modelación de la calidad de agua ya que no cuenta con un módulo de calidad de agua, únicamente se encarga del nitrógeno como potencial nutriente limitante razón por la cual no se pueden modelar otros determinantes importantes, además, no se logró la incorporación de series de tiempo de entrada al modelo.

Por otra parte, los resultados para los cinco primeros escenarios de modelación en condición de frontera crítica (Caudales altos-Concentraciones mínimas) muestran porcentajes de remoción entre 12 y 34% para COHERENS y de 70 y 99% para MOHID. Para el escenario con frontera crítica y condición hidrológica seca y concentraciones altas “condición actual” los valores de remoción reportados por COHERENS se encuentran entre un 12 y 35% y entre 93 y 99 % para todos los determinantes de calidad modelados con MOHID excepto el valor de los sólidos suspendidos totales el cual es del 41%. Por último, para los cuatro escenarios restantes bajo las condiciones inmediatamente mencionadas los valores de porcentaje de remoción son los mismos que para el escenario en condición actual; caso contrario para MOHID el cual los valores de remoción varían entre un 35 y un 96%. Lo anterior indica procesos biológicos en la represa del Muña y la capacidad de asimilar una fracción alta de carga contaminante.

Los resultados de la hidrodinámica en el Embalse fueron muy similares para COHERENS y para MOHID. Ambos modelos mostraron la influencia del viento sobre la distribución espacial de las concentraciones de los determinantes de calidad de agua y sobre el nivel del agua siendo mayor en la dirección en la que sopla el viento. Para este caso en particular la dirección predominante del viento es dirección sureste. Además se puede observar que los movimientos de agua con vectores de mayor magnitud se presentan muy cerca a la entrada y salida del embalse, destacándose como mayores las velocidades las zonas de bombeo y turbinación. También se observó que la velocidad presenta un comportamiento similar en el tiempo, no obstante, es mayor el valor de la magnitud en COHERENS que MOHID.



## **6. Conclusiones y recomendaciones**

### **6.1 Conclusiones generales**

Como conclusión principal de esta tesis se implementaron y se compararon los resultados arrojados por dos modelos hidrodinámicos y de calidad de agua (COHERENS y MOHID) en el embalse del Muña bajo diferentes escenarios de modelación definiendo la capacidad depurativa, aportando criterios para la selección de manejo y operación del embalse. También se estimó el valor de la demanda béntica existente en el Muña utilizando los modelos MOHID y LAKE2K alcanzando así los objetivos fijados para esta investigación, encontrándose como válida para el caso en estudio.

Comparando los resultados obtenidos de los dos programas utilizados para la modelación en general se encontró un comportamiento hidrodinámico y de calidad de agua similar en embalse del Muña, aunque los valores de porcentaje de cargas en el efluente con los porcentajes de remoción calculados muestran algunas diferencias entre los dos modelos. Lo anterior se puede presentar debido que con el programa MOHID se modelaron más determinantes de calidad de agua con series de entrada de tiempo a diferencia de COHERENS el cual solo se modelaron 3 determinantes de calidad de agua y 2 contaminantes con valores de entrada constante al embalse.

Según los modelos MOHID y LAKE2K, en general para los 10 escenarios de simulación existe un valor de la demanda béntica de oxígeno debida a los sedimentos presentes en el embalse, aunque son valores muy cercanos a cero. Lo anterior se presenta por las condiciones anaerobias que presenta el Muña.

### **6.2 Conclusiones por objetivos**

De manera general se puede concluir que se alcanzó el objetivo general de implementar 2 modelos hidrodinámicos y de calidad de agua evaluando la capacidad de asimilación de carga contaminante y la hidrodinámica presente en el embalse ayudando a definir el

nivel de tratamiento requerido de las aguas residuales de la ciudad de Bogotá bajo diferentes escenarios de modelación. Además se logró estimar el valor de la demanda béntica de oxígeno presente en el embalse utilizando los modelos MOHID y LAKE2K.

También, se plantearon algunos objetivos específicos en esta tesis de investigación que sirvieron de apoyo para lograr el objetivo general. Al hacer una revisión general de estos y teniendo en cuenta lo anteriormente dicho, se puede concluir que se alcanzaron cada uno de los objetivos específicos descritos en el capítulo 1.

### **6.3 Conclusiones del montaje de los modelos COHERENS, MOHID y LAKE2K**

Para llevar a cabo de esta tesis se utilizaron 2 modelos hidrodinámicos y de calidad de agua de uso libre COHERENS y MOHID desarrollados por el Programa de Ciencia y Tecnología Marina [MAST] de la Unión Europea durante el período 1990 – 1998 y por investigadores del MARETEC (Centro de Ambiente y Tecnologías Marítimas) perteneciente al Instituto Superior Técnico (IST) de la Universidad Técnica de Lisboa respectivamente. También se empleó el modelo LAKE2K utilizado para la simulación de la calidad de agua en Lagos.

Para el montaje en COHERENS fue necesario realizar modificaciones al código además de un programa en Visual Basic para lograr una compilación exitosa en la plataforma Windows debido que la versión presentada de COHERENS fue desarrollada para compilarse con Fortran G77 en sistemas operativos Linux o Unix, lo que dificultó el montaje realizado del Muña.

A diferencia del modelo anteriormente descrito, MOHID cuenta con una interfaz grafica de usuario permitiendo al modelo ser más amigable al usuario facilitando el montaje realizado.

Finalmente para L2K no se presentó mayor dificultad en el montaje de este modelo ya que Microsoft Excel es la interfaz grafica al usuario.



## 6.4 Conclusiones de la asimilación de la demanda béntica de oxígeno (SOD)

En general, se utilizaron los modelos MOHID y LAKE2K para medir el valor de la demanda béntica de oxígeno en el embalse del Muña para los 10 escenarios de simulación.

Para MOHID, se realizó la simulación sabiendo que el módulo de Benthos incorporado al modelo tiene en cuenta el agotamiento de oxígeno debido a los sedimentos. Para el LAKE2K, el valor de la demanda béntica se muestra gráficamente por el modelo.

En ambos casos existen valores de demanda béntica en el embalse pero muy cercanos a cero. En Particular el balance de oxígeno hecho con el módulo de Benthos de MOHID, mostró que existe un agotamiento total de oxígeno. En el caso del modelo LAKE2K, las graficas obtenidas muestran que a bajas profundidades existen valores de demanda béntica que varían entre 0.1 y 0.63gO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/d para los primeros cinco escenarios modelados en condición de frontera crítica (Caudal alto - Concentración mínima). Se presentaron valores entre 0.3 y 0.05 gO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/d a profundidades bajas y medias para el escenarios de modelación en condición de frontera crítica (Caudal bajo – Concentración máxima) “condición actual”. Finalmente valores de demanda béntica de oxígeno entre 0.3 y 0 gO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/d a profundidades bajas con caída súbita para los cuatro escenarios restantes en condición de frontera crítica (Caudal bajo – Concentración máxima).

Lo anterior se presenta dado que las concentraciones de oxígeno en el embalse son mínimas restringiendo el consumo de oxígeno. También se concluye que para el escenario de simulación en condición de frontera crítica (Caudal bajo – Concentración máxima) “condición actual” existe un valor mayor de demanda béntica a profundidades medias indicando que las concentraciones de oxígeno son mayores en el afluente comparados con los valores registrados para los cuatro escenarios restantes bajos las mismas condiciones.

Finalmente, se observó la estratificación presente en el embalse para los diez escenarios de modelación encontrando las tres capas características de los lagos (hipolimnion, metalimnion y epilimnion) bien diferenciadas.

## **6.5 Conclusiones Análisis de los resultados de la simulación de escenarios en el embalse del Muña**

De manera particular se presentan conclusiones del análisis de los resultados hidrodinámicos y de calidad del agua de la modelación del Embalse.

### **6.5.1 Hidrodinámica**

- A partir de los resultados obtenidos se puede concluir que la dirección del viento afecta la distribución espacial de la concentración de determinantes de calidad de agua en el embalse. Además se determinó una mayor velocidad en las zonas de bombeo y turbinación en la represa del Muña y una menor velocidad en el resto del cuerpo de agua. Finalmente, comparando las magnitudes de las velocidades en la salida del embalse (Torre Granada) se observa el mismo comportamiento a través del tiempo, no obstante, el valor de la magnitud es mayor para el programa COHERENS.

### **6.5.2 Calidad de agua**

- Para ambos modelos se evidencia la capacidad de asimilación de carga contaminante del Muña. Se cuantificó el decaimiento en las concentraciones de oxígeno y el ciclo del nitrógeno, además de dos contaminantes conservativos con el modelo COHERENS. Para MOHID se encontró el mismo comportamiento para los determinantes demanda bioquímica de oxígeno, sólidos suspendidos totales, oxígeno disuelto, nitratos, nitrógeno amoniacal, nitrógeno orgánico fósforo inorgánico, fósforo orgánico y coliformes totales, además del agotamiento del oxígeno debido a los sedimentos y los procesos biológicos mencionados anteriormente presentes en el embalse. El anterior análisis se realizó para 10 escenarios de simulación.
- No se puede realizar una comparación concluyente de los resultados de calidad del agua entre los modelos MOHID y COHERENS debido a las restricciones presentadas en la modelación con el último programa mencionado, la no implementación de series de tiempo y la falta de modelación de otros importantes determinantes de calidad del agua, No obstante, se observan porcentajes de

remoción de carga contaminante mayores en el modelo MOHID que en COHERENS.

- Por último, los resultados muestran que para el modelo COHERENS los valores de porcentaje de remoción son muy similares para los escenarios simulados presentando remociones entre 12 y 35% de los determinantes modelados para los primeros cinco escenarios y entre 12 y 34% para los cinco restantes. Para MOHID se observa un porcentaje de remoción de carga contaminante entre un 70 y 99% para los escenarios en frontera crítica con condición hidrológica húmeda y concentración de determinantes de calidad del agua mínima, una remoción entre un 93 y 99 % para todos los determinantes de calidad modelados excepto el valor de los sólidos suspendidos totales el cual es del 41% para el escenario en condición de frontera crítica (Caudal bajo – Concentración máxima) “condición actual” y finalmente valores de porcentaje remoción entre un 35 y 96% para los cuatro últimos escenarios restantes (PTAR Salitre con tratamiento secundario (TS) y PTAR Canoas con tratamiento primario (TP), PTAR Salitre TS y PTAR Canoas TS (con desinfección en ambas plantas), PTAR Salitre TS y PTAR Canoas con mitad TS ( $7 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y mitad sin tratamiento ( $7 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y PTAR Salitre TS y PTAR Canoas con mitad TS ( $7 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y mitad TP ( $7 \text{ m}^3/\text{s}$ )) bajo la condición de frontera crítica (Caudal bajo – Concentración máxima).

## 6.6 Recomendaciones

Siguiendo el protocolo de modelación descrito anteriormente, se recomienda extender el análisis de esta investigación realizando la calibración de los modelos a través de mediciones directas sobre el embalse con el propósito de que los resultados de los modelos se ajusten adecuadamente al comportamiento de la represa del Muña y la validación de los modelos para verificar el adecuado funcionamiento de los mismos.

Además se recomienda la toma de muestras de sedimentos en el embalse, generando bases de datos que permitan medir y analizar de manera más detallada la demanda béntica de oxígeno existente debida a los sedimentos presentes y lograr así una caracterización y tipificación de este factor en el Muña.

Finalmente, según las discusiones presentadas para la etapa de los modelos, en relación con COHERENS es recomendable y de gran utilidad crear una interfaz grafica para

utilizar los ejecutables en el sistema operativo Windows o utilizar sistemas operativos Linux o Unix para que el modelo sea más amigable al usuario. Además incorporar el modelo EFDC a la modelación del embalse ya que una gran cantidad de información recopilada es fundamental en la toma de decisiones.

## **Anexos**

A continuación se presenta en los Anexos A y B una muestra de 100 de los 720 datos hidrodinámicos y de calidad de agua utilizados por los modelos COHERENS, MOHID y LAKE2K respectivamente con el fin de no saturar el anexo del documento de tesis y el código del programa realizado en Visual Basic para graficar los datos obtenidos por el modelo COHERENS y MOHID. Los datos completos con los escenarios modelados en los programas computacionales anteriormente mencionados se encuentran almacenados en los CDs Anexos SABC1 y SABC2 (entregados junto con este documento). Estos CDs contienen cuatro carpetas cuyo contenido se lista a continuación:

- Archivo: Anexo Datos hidrodinámicos y de calidad de agua
- Archivo: Anexo Programa COHERENS
- Archivo: Anexo Programa LAKE2K
- Archivo: Anexo Programa MOHID



## A. Datos hidrodinámicos y de calidad de agua

DATOS HIDRODINÁMICOS				
Hora	Caudales Turbinados (m³/s)	Caudales Bombeados (m³/s)	Velocidad del viento eje X (m/s)	Velocidad del viento eje Y (m/s)
1	0	17.5	1.14	-1.14
2	0	17.5	1.14	-1.14
3	0	17.5	1.14	-1.14
4	0	17.5	1.14	-1.14
5	9.76	17.5	1.14	-1.14
6	12.46	17.5	1.14	-1.14
7	12.31	17.5	1.14	-1.14
8	12.45	17.5	1.14	-1.14
9	12.51	17.5	1.14	-1.14
10	12.36	17.5	1.14	-1.14
11	12.37	17.5	1.14	-1.14
12	12.38	17.5	1.14	-1.14
13	12.44	17.5	1.14	-1.14
14	8.31	17.5	1.14	-1.14
15	8.31	17.5	1.14	-1.14
16	8.39	17.5	1.14	-1.14
17	8.34	17.5	1.14	-1.14
18	12.48	17.5	1.14	-1.14
19	12.44	17.5	1.14	-1.14
20	12.41	17.5	1.14	-1.14
21	8.37	1.75	1.14	-1.14
22	8.3	0	1.14	-1.14
23	0.6	0	1.14	-1.14
24	0	0	0.97	-0.97
25	0	0	0.97	-0.97
26	0	0	0.97	-0.97
27	0	0	0.97	-0.97

28	0	0	0.97	-0.97
29	0	0	0.97	-0.97
30	0	0	0.97	-0.97
31	0.18	0	0.97	-0.97
32	7.22	0	0.97	-0.97
33	8.27	0	0.97	-0.97
34	8.29	0	0.97	-0.97
35	8.35	0	0.97	-0.97
36	8.27	0	0.97	-0.97
37	8.21	0	0.97	-0.97
38	8.26	0	0.97	-0.97
39	8.22	0	0.97	-0.97
40	8.25	0	0.97	-0.97
41	8.31	0	0.97	-0.97
42	8.3	0	0.97	-0.97
43	8.31	0	0.97	-0.97
44	8.36	0	0.97	-0.97
45	8.37	0	0.97	-0.97
46	0.29	0	0.97	-0.97
47	0	0	0.97	-0.97
48	0	0	1	-1
49	0	0.67	1	-1
50	0	8	1	-1
51	0	8	1	-1
52	0	8	1	-1
53	7.35	8	1	-1
54	8.3	8	1	-1
55	8.43	8	1	-1
56	8.42	8	1	-1
57	8.39	8	1	-1
58	8.36	8	1	-1
59	8.31	8	1	-1
60	8.28	8	1	-1
61	8.3	8	1	-1
62	8.3	8	1	-1
63	8.28	8	1	-1
64	8.28	8	1	-1
65	8.32	8	1	-1
66	22.83	8	1	-1
67	33.1	8	1	-1



---

68	23.88	8	1	-1
69	9.22	8	1	-1
70	8.26	8	1	-1
71	1.93	8	1	-1
72	0	8	0.89	0.89
73	0	8	0.89	0.89
74	0	8	0.89	0.89
75	0	8	0.89	0.89
76	38.13	8	0.89	0.89
77	7.44	8	0.89	0.89
78	8.24	8	0.89	0.89
79	8.27	8	0.89	0.89
80	8.23	8	0.89	0.89
81	8.24	8	0.89	0.89
82	8.27	8	0.89	0.89
83	8.29	8	0.89	0.89
84	8.28	8	0.89	0.89
85	8.24	8	0.89	0.89
86	8.26	8	0.89	0.89
87	8.28	8	0.89	0.89
88	8.25	8	0.89	0.89
89	8.35	8	0.89	0.89
90	18.99	8	0.89	0.89
91	31.88	19.67	0.89	0.89
92	16.46	25.5	0.89	0.89
93	8.45	25.5	0.89	0.89
94	8.31	25.5	0.89	0.89
95	8.43	25.5	0.89	0.89
96	26.46	25.5	-1.6	0
97	20.9	25.5	-1.6	0
98	19.25	25.5	-1.6	0
99	22.29	25.5	-1.6	0
100	30.11	25.5	-1.6	0
....	....	....	....	....

DATOS DETERMINANTES DE CALIDAD DE AGUA (mg/l)										
Caudal alto - Concentración mínima (Condición actual)										
Hora	Temp. ( °C)	SST	CT	DBO	NO	NO3	NH4	PO	INP	OD
1	15.25	112.12	18322000	58.40	2.81	0.25	12.18	2.19	1.22	4.27
2	15.25	109.76	15209000	56.73	2.64	0.41	12.08	2.05	1.31	0.19
3	15.25	109.01	14660000	56.38	2.60	0.30	12.18	2.02	1.33	0.00
4	15.25	106.31	12868000	55.22	2.49	0.49	12.03	1.93	1.39	0.00
5	15.25	105.71	12581000	54.96	2.47	0.48	12.05	1.92	1.40	0.00
6	15.25	105.03	12145000	54.64	2.44	0.45	12.08	1.89	1.42	0.00
7	15.25	102.54	10620000	53.46	2.33	0.33	12.21	1.81	1.47	0.00
8	15.25	101.46	10110000	52.94	2.28	0.25	12.29	1.77	1.50	0.00
9	15.25	101.24	10021000	52.83	2.27	0.23	12.32	1.76	1.50	0.00
10	15.25	100.83	9706000	52.57	2.25	0.25	12.30	1.74	1.51	0.00
11	15.25	99.06	8519000	51.42	2.13	0.32	12.25	1.66	1.57	0.00
12	15.25	96.20	7015000	49.54	1.94	0.35	12.25	1.53	1.66	0.00
13	15.25	93.76	6143000	47.91	1.79	0.31	12.31	1.43	1.72	0.00
14	15.26	92.39	5803000	46.80	1.71	0.26	12.38	1.37	1.77	0.00
15	15.26	92.67	5785000	46.10	1.67	0.23	12.43	1.35	1.79	0.00
16	15.28	94.77	5960000	45.69	1.68	0.21	12.47	1.35	1.81	0.00
17	15.30	97.77	6134000	45.46	1.71	0.19	12.50	1.37	1.82	0.00
18	15.33	99.97	6141000	45.30	1.73	0.19	12.52	1.39	1.83	0.00
19	15.34	100.65	5968000	45.30	1.74	0.18	12.56	1.41	1.85	0.00
20	15.38	101.36	5754000	45.87	1.73	0.18	12.70	1.45	1.88	0.00
21	15.44	104.96	5620000	47.43	1.70	0.19	13.01	1.49	1.92	0.00
22	15.52	111.00	5587000	49.19	1.68	0.22	13.45	1.51	1.96	0.00
23	15.60	116.17	5666000	49.93	1.67	0.24	13.79	1.51	1.98	0.00
24	15.64	116.93	5656000	49.32	1.62	0.26	13.87	1.47	1.98	0.00
25	15.63	112.73	5479000	47.83	1.54	0.28	13.68	1.40	1.97	0.00
26	15.59	104.91	5234000	46.03	1.46	0.29	13.32	1.31	1.95	0.00
27	15.52	96.16	5020000	44.53	1.40	0.30	12.95	1.22	1.94	0.00
28	15.44	89.28	4895000	43.68	1.36	0.31	12.71	1.16	1.93	0.00
29	15.37	85.50	4851000	43.29	1.34	0.31	12.62	1.13	1.94	0.00

30	15.31	83.83	4821000	43.13	1.33	0.30	12.65	1.12	1.95	0.00
31	15.28	82.99	4775000	43.03	1.34	0.29	12.72	1.11	1.96	0.00
32	15.28	82.56	4740000	42.94	1.36	0.27	12.79	1.10	1.98	0.00
33	15.28	82.64	4739000	42.87	1.39	0.25	12.86	1.10	1.99	0.00
34	15.30	83.59	4761000	42.93	1.41	0.23	12.92	1.10	2.01	0.00
35	15.32	85.33	4772000	43.20	1.40	0.23	13.00	1.09	2.03	0.00
36	15.34	87.40	4744000	43.68	1.37	0.22	13.07	1.09	2.06	0.00
37	15.37	89.16	4678000	44.19	1.32	0.23	13.09	1.09	2.09	0.00
38	15.39	90.41	4612000	44.58	1.28	0.23	13.04	1.09	2.12	0.00
39	15.40	91.82	4632000	44.79	1.25	0.23	12.92	1.09	2.13	0.00
40	15.41	94.06	4767000	44.85	1.24	0.24	12.76	1.11	2.14	0.00
41	15.42	96.61	4888000	44.78	1.25	0.24	12.58	1.13	2.13	0.00
42	15.43	98.09	4858000	44.57	1.26	0.24	12.44	1.14	2.13	0.00
43	15.44	97.95	4680000	44.38	1.25	0.24	12.38	1.16	2.13	0.00
44	15.48	97.84	4484000	44.75	1.23	0.24	12.50	1.20	2.15	0.00
45	15.55	100.98	4425000	46.28	1.21	0.24	12.90	1.24	2.18	0.00
46	15.67	107.16	4555000	48.26	1.23	0.23	13.51	1.27	2.21	0.00
47	15.78	113.06	4859000	49.43	1.27	0.23	14.11	1.29	2.23	0.00
48	15.86	115.05	5075000	49.45	1.28	0.22	14.47	1.27	2.22	0.00
49	15.91	111.81	5077000	48.57	1.26	0.21	14.56	1.23	2.21	0.00
50	15.91	104.78	4965000	47.31	1.24	0.21	14.45	1.16	2.19	0.00
51	15.88	96.79	4847000	46.24	1.23	0.20	14.31	1.09	2.17	0.00
52	15.83	90.71	4797000	45.70	1.23	0.20	14.23	1.04	2.17	0.00
53	15.76	87.72	4817000	45.49	1.24	0.19	14.24	1.03	2.17	0.00
54	15.70	86.86	4850000	45.40	1.25	0.19	14.29	1.03	2.18	0.00
55	15.66	86.69	4860000	45.30	1.27	0.19	14.32	1.04	2.19	0.00
56	15.63	86.69	4873000	45.11	1.30	0.20	14.30	1.05	2.20	0.00
57	15.60	87.01	4913000	44.89	1.33	0.20	14.23	1.05	2.20	0.00
58	15.57	88.00	4969000	44.76	1.35	0.20	14.14	1.06	2.21	0.00
59	15.55	89.72	5009000	44.86	1.35	0.21	14.05	1.07	2.22	0.00
60	15.54	91.75	5004000	45.17	1.32	0.21	13.96	1.07	2.23	0.00
61	15.53	93.45	4955000	45.56	1.27	0.21	13.83	1.08	2.25	0.00
62	15.52	94.65	4896000	45.88	1.24	0.22	13.64	1.09	2.26	0.00
63	15.50	96.14	4921000	46.05	1.22	0.22	13.39	1.10	2.27	0.00
64	15.49	98.49	5049000	46.13	1.23	0.22	13.11	1.13	2.26	0.00

65	15.49	101.06	5155000	46.09	1.25	0.22	12.85	1.16	2.24	0.00
66	15.49	102.41	5110000	45.91	1.26	0.22	12.64	1.18	2.23	0.00
67	15.50	101.89	4907000	45.74	1.26	0.22	12.53	1.21	2.22	0.00
68	15.53	101.28	4681000	46.13	1.24	0.22	12.61	1.24	2.23	0.00
69	15.60	103.67	4582000	47.58	1.22	0.22	12.97	1.28	2.26	0.00
70	15.71	109.14	4680000	49.47	1.24	0.22	13.56	1.31	2.28	0.00
71	15.82	114.13	4940000	50.51	1.27	0.21	14.12	1.33	2.28	0.00
72	15.90	114.81	5100000	50.30	1.27	0.21	14.43	1.30	2.27	0.00
73	15.93	110.46	5053000	49.26	1.25	0.21	14.47	1.25	2.25	0.00
74	15.93	102.66	4902000	47.90	1.22	0.20	14.33	1.18	2.22	0.00
75	15.90	94.26	4757000	46.79	1.21	0.20	14.18	1.11	2.20	0.00
76	15.85	87.66	4676000	46.13	1.21	0.20	14.10	1.06	2.19	0.00
77	15.79	84.17	4668000	45.82	1.22	0.20	14.11	1.04	2.19	0.00
78	15.74	82.64	4667000	45.61	1.23	0.20	14.16	1.04	2.19	0.00
79	15.70	81.81	4639000	45.34	1.26	0.20	14.18	1.04	2.19	0.00
80	15.67	81.17	4612000	44.97	1.29	0.20	14.15	1.04	2.19	0.00
81	15.65	80.97	4612000	44.54	1.33	0.21	14.07	1.04	2.18	0.00
82	15.63	81.57	4627000	44.21	1.35	0.21	13.97	1.04	2.18	0.00
83	15.62	83.00	4620000	44.11	1.35	0.21	13.86	1.04	2.18	0.00
84	15.61	84.69	4559000	44.23	1.31	0.22	13.75	1.04	2.19	0.00
85	15.60	85.96	4445000	44.40	1.25	0.22	13.59	1.04	2.20	0.00
86	15.60	86.42	4315000	44.45	1.21	0.22	13.35	1.03	2.21	0.00
87	15.59	86.63	4262000	44.33	1.17	0.22	13.05	1.04	2.20	0.00
88	15.58	87.21	4328000	44.05	1.16	0.22	12.71	1.05	2.18	0.00
89	15.58	87.64	4366000	43.64	1.15	0.22	12.39	1.05	2.15	0.00
90	15.59	86.96	4245000	43.07	1.14	0.22	12.12	1.05	2.11	0.00
91	15.59	84.81	3956000	42.47	1.12	0.22	11.96	1.05	2.09	0.00
92	15.61	82.49	3645000	42.20	1.09	0.22	11.97	1.06	2.08	0.00
93	15.66	82.11	3467000	42.63	1.07	0.22	12.21	1.07	2.07	0.00
94	15.73	83.41	3438000	43.32	1.07	0.21	12.61	1.07	2.07	0.00
95	15.81	84.41	3509000	43.54	1.09	0.21	13.02	1.06	2.07	0.00
96	15.87	83.31	3533000	43.19	1.10	0.20	13.33	1.04	2.05	0.00
97	15.92	79.67	3458000	42.50	1.09	0.20	13.51	1.00	2.04	0.00
98	15.95	74.71	3357000	41.76	1.09	0.19	13.62	0.95	2.03	0.00
99	15.96	69.83	3284000	41.21	1.10	0.19	13.72	0.91	2.02	0.00

100	15.96	66.29	3267000	40.94	1.11	0.18	13.86	0.88	2.02	0.00
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
<b>Caudal alto - Concentración mínima (Salitre Tratamiento Secundario - Canoas Tratamiento Primario)</b>										
Hora	Temp.(°C)	SST	CT	DBO	NO	NO3	NH4	PO	INP	OD
1	15.25	112.12	18322000	58.40	2.81	0.25	12.18	2.19	1.22	4.27
2	15.25	109.76	15209000	56.73	2.64	0.41	12.08	2.05	1.31	0.19
3	15.25	109.01	14660000	56.38	2.60	0.30	12.18	2.02	1.33	0.00
4	15.25	106.31	12868000	55.22	2.49	0.49	12.03	1.93	1.39	0.00
5	15.25	105.71	12581000	54.96	2.47	0.48	12.05	1.92	1.40	0.00
6	15.25	105.03	12145000	54.64	2.44	0.45	12.08	1.89	1.42	0.00
7	15.25	102.54	10620000	53.46	2.33	0.33	12.21	1.81	1.47	0.00
8	15.25	101.46	10110000	52.94	2.28	0.25	12.29	1.77	1.50	0.00
9	15.25	101.24	10021000	52.83	2.27	0.23	12.32	1.76	1.50	0.00
10	15.25	100.83	9706000	52.57	2.25	0.25	12.30	1.74	1.51	0.00
11	15.25	99.06	8519000	51.42	2.13	0.32	12.25	1.66	1.57	0.00
12	15.25	96.20	7015000	49.54	1.94	0.35	12.25	1.53	1.66	0.00
13	15.25	93.76	6143000	47.91	1.79	0.31	12.31	1.43	1.72	0.00
14	15.26	92.39	5803000	46.80	1.71	0.26	12.38	1.37	1.77	0.00
15	15.26	92.67	5785000	46.10	1.67	0.23	12.43	1.35	1.79	0.00
16	15.28	94.77	5960000	45.69	1.68	0.21	12.47	1.35	1.81	0.00
17	15.30	97.77	6134000	45.46	1.71	0.19	12.50	1.37	1.82	0.00
18	15.33	99.97	6141000	45.30	1.73	0.19	12.52	1.39	1.83	0.00
19	15.34	100.65	5968000	45.30	1.74	0.18	12.56	1.41	1.85	0.00
20	15.38	101.36	5754000	45.87	1.73	0.18	12.70	1.45	1.88	0.00
21	15.44	104.96	5620000	47.43	1.70	0.19	13.01	1.49	1.92	0.00
22	15.52	111.00	5587000	49.19	1.68	0.22	13.45	1.51	1.96	0.00
23	15.60	116.17	5666000	49.93	1.67	0.24	13.79	1.51	1.98	0.00
24	15.64	116.93	5656000	49.32	1.62	0.26	13.87	1.47	1.98	0.00
25	15.63	112.73	5479000	47.83	1.54	0.28	13.68	1.40	1.97	0.00
26	15.59	104.91	5234000	46.03	1.46	0.29	13.32	1.31	1.95	0.00
27	15.52	96.16	5020000	44.53	1.40	0.30	12.95	1.22	1.94	0.00
28	15.44	89.28	4895000	43.68	1.36	0.31	12.71	1.16	1.93	0.00

29	15.37	85.50	4851000	43.29	1.34	0.31	12.62	1.13	1.94	0.00
30	15.31	83.83	4821000	43.13	1.33	0.30	12.65	1.12	1.95	0.00
31	15.28	82.99	4775000	43.03	1.34	0.29	12.72	1.11	1.96	0.00
32	15.28	82.56	4740000	42.94	1.36	0.27	12.79	1.10	1.98	0.00
33	15.28	82.64	4739000	42.87	1.39	0.25	12.86	1.10	1.99	0.00
34	15.30	83.59	4761000	42.93	1.41	0.23	12.92	1.10	2.01	0.00
35	15.32	85.33	4772000	43.20	1.40	0.23	13.00	1.09	2.03	0.00
36	15.34	87.40	4744000	43.68	1.37	0.22	13.07	1.09	2.06	0.00
37	15.37	89.16	4678000	44.19	1.32	0.23	13.09	1.09	2.09	0.00
38	15.39	90.41	4612000	44.58	1.28	0.23	13.04	1.09	2.12	0.00
39	15.40	91.82	4632000	44.79	1.25	0.23	12.92	1.09	2.13	0.00
40	15.41	94.06	4767000	44.85	1.24	0.24	12.76	1.11	2.14	0.00
41	15.42	96.61	4888000	44.78	1.25	0.24	12.58	1.13	2.13	0.00
42	15.43	98.09	4858000	44.57	1.26	0.24	12.44	1.14	2.13	0.00
43	15.44	97.95	4680000	44.38	1.25	0.24	12.38	1.16	2.13	0.00
44	15.48	97.84	4484000	44.75	1.23	0.24	12.50	1.20	2.15	0.00
45	15.55	100.98	4425000	46.28	1.21	0.24	12.90	1.24	2.18	0.00
46	15.67	107.16	4555000	48.26	1.23	0.23	13.51	1.27	2.21	0.00
47	15.78	113.06	4859000	49.43	1.27	0.23	14.11	1.29	2.23	0.00
48	15.86	115.05	5075000	49.45	1.28	0.22	14.47	1.27	2.22	0.00
49	15.91	111.81	5077000	48.57	1.26	0.21	14.56	1.23	2.21	0.00
50	15.91	104.78	4965000	47.31	1.24	0.21	14.45	1.16	2.19	0.00
51	15.88	96.79	4847000	46.24	1.23	0.20	14.31	1.09	2.17	0.00
52	15.83	90.71	4797000	45.70	1.23	0.20	14.23	1.04	2.17	0.00
53	15.76	87.72	4817000	45.49	1.24	0.19	14.24	1.03	2.17	0.00
54	15.70	86.86	4850000	45.40	1.25	0.19	14.29	1.03	2.18	0.00
55	15.66	86.69	4860000	45.30	1.27	0.19	14.32	1.04	2.19	0.00
56	15.63	86.69	4873000	45.11	1.30	0.20	14.30	1.05	2.20	0.00
57	15.60	87.01	4913000	44.89	1.33	0.20	14.23	1.05	2.20	0.00
58	15.57	88.00	4969000	44.76	1.35	0.20	14.14	1.06	2.21	0.00
59	15.55	89.72	5009000	44.86	1.35	0.21	14.05	1.07	2.22	0.00
60	15.54	91.75	5004000	45.17	1.32	0.21	13.96	1.07	2.23	0.00
61	15.53	93.45	4955000	45.56	1.27	0.21	13.83	1.08	2.25	0.00
62	15.52	94.65	4896000	45.88	1.24	0.22	13.64	1.09	2.26	0.00
63	15.50	96.14	4921000	46.05	1.22	0.22	13.39	1.10	2.27	0.00

64	15.49	98.49	5049000	46.13	1.23	0.22	13.11	1.13	2.26	0.00
65	15.49	101.06	5155000	46.09	1.25	0.22	12.85	1.16	2.24	0.00
66	15.49	102.41	5110000	45.91	1.26	0.22	12.64	1.18	2.23	0.00
67	15.50	101.89	4907000	45.74	1.26	0.22	12.53	1.21	2.22	0.00
68	15.53	101.28	4681000	46.13	1.24	0.22	12.61	1.24	2.23	0.00
69	15.60	103.67	4582000	47.58	1.22	0.22	12.97	1.28	2.26	0.00
70	15.71	109.14	4680000	49.47	1.24	0.22	13.56	1.31	2.28	0.00
71	15.82	114.13	4940000	50.51	1.27	0.21	14.12	1.33	2.28	0.00
72	15.90	114.81	5100000	50.30	1.27	0.21	14.43	1.30	2.27	0.00
73	15.93	110.46	5053000	49.26	1.25	0.21	14.47	1.25	2.25	0.00
74	15.93	102.66	4902000	47.90	1.22	0.20	14.33	1.18	2.22	0.00
75	15.90	94.26	4757000	46.79	1.21	0.20	14.18	1.11	2.20	0.00
76	15.85	87.66	4676000	46.13	1.21	0.20	14.10	1.06	2.19	0.00
77	15.79	84.17	4668000	45.82	1.22	0.20	14.11	1.04	2.19	0.00
78	15.74	82.64	4667000	45.61	1.23	0.20	14.16	1.04	2.19	0.00
79	15.70	81.81	4639000	45.34	1.26	0.20	14.18	1.04	2.19	0.00
80	15.67	81.17	4612000	44.97	1.29	0.20	14.15	1.04	2.19	0.00
81	15.65	80.97	4612000	44.54	1.33	0.21	14.07	1.04	2.18	0.00
82	15.63	81.57	4627000	44.21	1.35	0.21	13.97	1.04	2.18	0.00
83	15.62	83.00	4620000	44.11	1.35	0.21	13.86	1.04	2.18	0.00
84	15.61	84.69	4559000	44.23	1.31	0.22	13.75	1.04	2.19	0.00
85	15.60	85.96	4445000	44.40	1.25	0.22	13.59	1.04	2.20	0.00
86	15.60	86.42	4315000	44.45	1.21	0.22	13.35	1.03	2.21	0.00
87	15.59	86.63	4262000	44.33	1.17	0.22	13.05	1.04	2.20	0.00
88	15.58	87.21	4328000	44.05	1.16	0.22	12.71	1.05	2.18	0.00
89	15.58	87.64	4366000	43.64	1.15	0.22	12.39	1.05	2.15	0.00
90	15.59	86.96	4245000	43.07	1.14	0.22	12.12	1.05	2.11	0.00
91	15.59	84.81	3956000	42.47	1.12	0.22	11.96	1.05	2.09	0.00
92	15.61	82.49	3645000	42.20	1.09	0.22	11.97	1.06	2.08	0.00
93	15.66	82.11	3467000	42.63	1.07	0.22	12.21	1.07	2.07	0.00
94	15.73	83.41	3438000	43.32	1.07	0.21	12.61	1.07	2.07	0.00
95	15.81	84.41	3509000	43.54	1.09	0.21	13.02	1.06	2.07	0.00
96	15.87	83.31	3533000	43.19	1.10	0.20	13.33	1.04	2.05	0.00
97	15.92	79.67	3458000	42.50	1.09	0.20	13.51	1.00	2.04	0.00
98	15.95	74.71	3357000	41.76	1.09	0.19	13.62	0.95	2.03	0.00

99	15.96	69.83	3284000	41.21	1.10	0.19	13.72	0.91	2.02	0.00
100	15.96	66.29	3267000	40.94	1.11	0.18	13.86	0.88	2.02	0.00
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
<b>Caudal alto - Concentración mínima (Salitre Tratamiento Secundario - Canoas Tratamiento Secundario (desinfección))</b>										
Hora	Temp. (°C)	SST	CT	DBO	NO	NO3	NH4	PO	INP	OD
1	15.25	112.12	18322000	58.40	2.81	0.25	12.18	2.19	1.22	4.27
2	15.25	109.76	15209000	56.73	2.64	0.41	12.08	2.05	1.31	0.19
3	15.25	109.01	14660000	56.38	2.60	0.30	12.18	2.02	1.33	0.00
4	15.25	106.31	12868000	55.22	2.49	0.49	12.03	1.93	1.39	0.00
5	15.25	105.71	12581000	54.96	2.47	0.48	12.05	1.92	1.40	0.00
6	15.25	105.03	12145000	54.64	2.44	0.45	12.08	1.89	1.42	0.00
7	15.25	102.54	10620000	53.46	2.33	0.33	12.21	1.81	1.47	0.00
8	15.25	101.46	10110000	52.94	2.28	0.25	12.29	1.77	1.50	0.00
9	15.25	101.24	10021000	52.83	2.27	0.23	12.32	1.76	1.50	0.00
10	15.25	100.83	9706000	52.57	2.25	0.25	12.30	1.74	1.51	0.00
11	15.25	99.06	8519000	51.42	2.13	0.32	12.25	1.66	1.57	0.00
12	15.25	96.20	7015000	49.54	1.94	0.35	12.25	1.53	1.66	0.00
13	15.25	93.76	6143000	47.91	1.79	0.31	12.31	1.43	1.72	0.00
14	15.26	92.39	5803000	46.80	1.71	0.26	12.38	1.37	1.77	0.00
15	15.26	92.67	5785000	46.10	1.67	0.23	12.43	1.35	1.79	0.00
16	15.28	94.77	5960000	45.69	1.68	0.21	12.47	1.35	1.81	0.00
17	15.30	97.77	6134000	45.46	1.71	0.19	12.50	1.37	1.82	0.00
18	15.33	99.97	6141000	45.30	1.73	0.19	12.52	1.39	1.83	0.00
19	15.34	100.65	5968000	45.30	1.74	0.18	12.56	1.41	1.85	0.00
20	15.38	101.36	5754000	45.87	1.73	0.18	12.70	1.45	1.88	0.00
21	15.44	104.96	5620000	47.43	1.70	0.19	13.01	1.49	1.92	0.00
22	15.52	111.00	5587000	49.19	1.68	0.22	13.45	1.51	1.96	0.00
23	15.60	116.17	5666000	49.93	1.67	0.24	13.79	1.51	1.98	0.00
24	15.64	116.93	5656000	49.32	1.62	0.26	13.87	1.47	1.98	0.00
25	15.63	112.73	5479000	47.83	1.54	0.28	13.68	1.40	1.97	0.00
26	15.59	104.91	5234000	46.03	1.46	0.29	13.32	1.31	1.95	0.00
27	15.52	96.16	5020000	44.53	1.40	0.30	12.95	1.22	1.94	0.00



28	15.44	89.28	4895000	43.68	1.36	0.31	12.71	1.16	1.93	0.00
29	15.37	85.50	4851000	43.29	1.34	0.31	12.62	1.13	1.94	0.00
30	15.31	83.83	4821000	43.13	1.33	0.30	12.65	1.12	1.95	0.00
31	15.28	82.99	4775000	43.03	1.34	0.29	12.72	1.11	1.96	0.00
32	15.28	82.56	4740000	42.94	1.36	0.27	12.79	1.10	1.98	0.00
33	15.28	82.64	4739000	42.87	1.39	0.25	12.86	1.10	1.99	0.00
34	15.30	83.59	4761000	42.93	1.41	0.23	12.92	1.10	2.01	0.00
35	15.32	85.33	4772000	43.20	1.40	0.23	13.00	1.09	2.03	0.00
36	15.34	87.40	4744000	43.68	1.37	0.22	13.07	1.09	2.06	0.00
37	15.37	89.16	4678000	44.19	1.32	0.23	13.09	1.09	2.09	0.00
38	15.39	90.41	4612000	44.58	1.28	0.23	13.04	1.09	2.12	0.00
39	15.40	91.82	4632000	44.79	1.25	0.23	12.92	1.09	2.13	0.00
40	15.41	94.06	4767000	44.85	1.24	0.24	12.76	1.11	2.14	0.00
41	15.42	96.61	4888000	44.78	1.25	0.24	12.58	1.13	2.13	0.00
42	15.43	98.09	4858000	44.57	1.26	0.24	12.44	1.14	2.13	0.00
43	15.44	97.95	4680000	44.38	1.25	0.24	12.38	1.16	2.13	0.00
44	15.48	97.84	4484000	44.75	1.23	0.24	12.50	1.20	2.15	0.00
45	15.55	100.98	4425000	46.28	1.21	0.24	12.90	1.24	2.18	0.00
46	15.67	107.16	4555000	48.26	1.23	0.23	13.51	1.27	2.21	0.00
47	15.78	113.06	4859000	49.43	1.27	0.23	14.11	1.29	2.23	0.00
48	15.86	115.05	5075000	49.45	1.28	0.22	14.47	1.27	2.22	0.00
49	15.91	111.81	5077000	48.57	1.26	0.21	14.56	1.23	2.21	0.00
50	15.91	104.78	4965000	47.31	1.24	0.21	14.45	1.16	2.19	0.00
51	15.88	96.79	4847000	46.24	1.23	0.20	14.31	1.09	2.17	0.00
52	15.83	90.71	4797000	45.70	1.23	0.20	14.23	1.04	2.17	0.00
53	15.76	87.72	4817000	45.49	1.24	0.19	14.24	1.03	2.17	0.00
54	15.70	86.86	4850000	45.40	1.25	0.19	14.29	1.03	2.18	0.00
55	15.66	86.69	4860000	45.30	1.27	0.19	14.32	1.04	2.19	0.00
56	15.63	86.69	4873000	45.11	1.30	0.20	14.30	1.05	2.20	0.00
57	15.60	87.01	4913000	44.89	1.33	0.20	14.23	1.05	2.20	0.00
58	15.57	88.00	4969000	44.76	1.35	0.20	14.14	1.06	2.21	0.00
59	15.55	89.72	5009000	44.86	1.35	0.21	14.05	1.07	2.22	0.00
60	15.54	91.75	5004000	45.17	1.32	0.21	13.96	1.07	2.23	0.00
61	15.53	93.45	4955000	45.56	1.27	0.21	13.83	1.08	2.25	0.00
62	15.52	94.65	4896000	45.88	1.24	0.22	13.64	1.09	2.26	0.00

63	15.50	96.14	4921000	46.05	1.22	0.22	13.39	1.10	2.27	0.00
64	15.49	98.49	5049000	46.13	1.23	0.22	13.11	1.13	2.26	0.00
65	15.49	101.06	5155000	46.09	1.25	0.22	12.85	1.16	2.24	0.00
66	15.49	102.41	5110000	45.91	1.26	0.22	12.64	1.18	2.23	0.00
67	15.50	101.89	4907000	45.74	1.26	0.22	12.53	1.21	2.22	0.00
68	15.53	101.28	4681000	46.13	1.24	0.22	12.61	1.24	2.23	0.00
69	15.60	103.67	4582000	47.58	1.22	0.22	12.97	1.28	2.26	0.00
70	15.71	109.14	4680000	49.47	1.24	0.22	13.56	1.31	2.28	0.00
71	15.82	114.13	4940000	50.51	1.27	0.21	14.12	1.33	2.28	0.00
72	15.90	114.81	5100000	50.30	1.27	0.21	14.43	1.30	2.27	0.00
73	15.93	110.46	5053000	49.26	1.25	0.21	14.47	1.25	2.25	0.00
74	15.93	102.66	4902000	47.90	1.22	0.20	14.33	1.18	2.22	0.00
75	15.90	94.26	4757000	46.79	1.21	0.20	14.18	1.11	2.20	0.00
76	15.85	87.66	4676000	46.13	1.21	0.20	14.10	1.06	2.19	0.00
77	15.79	84.17	4668000	45.82	1.22	0.20	14.11	1.04	2.19	0.00
78	15.74	82.64	4667000	45.61	1.23	0.20	14.16	1.04	2.19	0.00
79	15.70	81.81	4639000	45.34	1.26	0.20	14.18	1.04	2.19	0.00
80	15.67	81.17	4612000	44.97	1.29	0.20	14.15	1.04	2.19	0.00
81	15.65	80.97	4612000	44.54	1.33	0.21	14.07	1.04	2.18	0.00
82	15.63	81.57	4627000	44.21	1.35	0.21	13.97	1.04	2.18	0.00
83	15.62	83.00	4620000	44.11	1.35	0.21	13.86	1.04	2.18	0.00
84	15.61	84.69	4559000	44.23	1.31	0.22	13.75	1.04	2.19	0.00
85	15.60	85.96	4445000	44.40	1.25	0.22	13.59	1.04	2.20	0.00
86	15.60	86.42	4315000	44.45	1.21	0.22	13.35	1.03	2.21	0.00
87	15.59	86.63	4262000	44.33	1.17	0.22	13.05	1.04	2.20	0.00
88	15.58	87.21	4328000	44.05	1.16	0.22	12.71	1.05	2.18	0.00
89	15.58	87.64	4366000	43.64	1.15	0.22	12.39	1.05	2.15	0.00
90	15.59	86.96	4245000	43.07	1.14	0.22	12.12	1.05	2.11	0.00
91	15.59	84.81	3956000	42.47	1.12	0.22	11.96	1.05	2.09	0.00
92	15.61	82.49	3645000	42.20	1.09	0.22	11.97	1.06	2.08	0.00
93	15.66	82.11	3467000	42.63	1.07	0.22	12.21	1.07	2.07	0.00
94	15.73	83.41	3438000	43.32	1.07	0.21	12.61	1.07	2.07	0.00
95	15.81	84.41	3509000	43.54	1.09	0.21	13.02	1.06	2.07	0.00
96	15.87	83.31	3533000	43.19	1.10	0.20	13.33	1.04	2.05	0.00
97	15.92	79.67	3458000	42.50	1.09	0.20	13.51	1.00	2.04	0.00

98	15.95	74.71	3357000	41.76	1.09	0.19	13.62	0.95	2.03	0.00
99	15.96	69.83	3284000	41.21	1.10	0.19	13.72	0.91	2.02	0.00
100	15.96	66.29	3267000	40.94	1.11	0.18	13.86	0.88	2.02	0.00
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
<b>Caudal alto - Concentración mínima ( Salitre Tratamiento Secundario - Canoas Tratamiento Secundario - sin Tratamiento (50-50, desinfección))</b>										
Hora	Temp.	SST	CT	DBO	NO	NO3	NH4	PO	INP	OD
1	15.25	112.12	18322000	58.40	2.81	0.25	12.18	2.19	1.22	4.27
2	15.25	109.76	15209000	56.73	2.64	0.41	12.08	2.05	1.31	0.19
3	15.25	109.01	14660000	56.38	2.60	0.30	12.18	2.02	1.33	0.00
4	15.25	106.31	12868000	55.22	2.49	0.49	12.03	1.93	1.39	0.00
5	15.25	105.71	12581000	54.96	2.47	0.48	12.05	1.92	1.40	0.00
6	15.25	105.03	12145000	54.64	2.44	0.45	12.08	1.89	1.42	0.00
7	15.25	102.54	10620000	53.46	2.33	0.33	12.21	1.81	1.47	0.00
8	15.25	101.46	10110000	52.94	2.28	0.25	12.29	1.77	1.50	0.00
9	15.25	101.24	10021000	52.83	2.27	0.23	12.32	1.76	1.50	0.00
10	15.25	100.83	9706000	52.57	2.25	0.25	12.30	1.74	1.51	0.00
11	15.25	99.06	8519000	51.42	2.13	0.32	12.25	1.66	1.57	0.00
12	15.25	96.20	7015000	49.54	1.94	0.35	12.25	1.53	1.66	0.00
13	15.25	93.76	6143000	47.91	1.79	0.31	12.31	1.43	1.72	0.00
14	15.26	92.39	5803000	46.80	1.71	0.26	12.38	1.37	1.77	0.00
15	15.26	92.67	5785000	46.10	1.67	0.23	12.43	1.35	1.79	0.00
16	15.28	94.77	5960000	45.69	1.68	0.21	12.47	1.35	1.81	0.00
17	15.30	97.77	6134000	45.46	1.71	0.19	12.50	1.37	1.82	0.00
18	15.33	99.97	6141000	45.30	1.73	0.19	12.52	1.39	1.83	0.00
19	15.34	100.65	5968000	45.30	1.74	0.18	12.56	1.41	1.85	0.00
20	15.38	101.36	5754000	45.87	1.73	0.18	12.70	1.45	1.88	0.00
21	15.44	104.96	5620000	47.43	1.70	0.19	13.01	1.49	1.92	0.00
22	15.52	111.00	5587000	49.19	1.68	0.22	13.45	1.51	1.96	0.00
23	15.60	116.17	5666000	49.93	1.67	0.24	13.79	1.51	1.98	0.00
24	15.64	116.93	5656000	49.32	1.62	0.26	13.87	1.47	1.98	0.00
25	15.63	112.73	5479000	47.83	1.54	0.28	13.68	1.40	1.97	0.00
26	15.59	104.91	5234000	46.03	1.46	0.29	13.32	1.31	1.95	0.00

27	15.52	96.16	5020000	44.53	1.40	0.30	12.95	1.22	1.94	0.00
28	15.44	89.28	4895000	43.68	1.36	0.31	12.71	1.16	1.93	0.00
29	15.37	85.50	4851000	43.29	1.34	0.31	12.62	1.13	1.94	0.00
30	15.31	83.83	4821000	43.13	1.33	0.30	12.65	1.12	1.95	0.00
31	15.28	82.99	4775000	43.03	1.34	0.29	12.72	1.11	1.96	0.00
32	15.28	82.56	4740000	42.94	1.36	0.27	12.79	1.10	1.98	0.00
33	15.28	82.64	4739000	42.87	1.39	0.25	12.86	1.10	1.99	0.00
34	15.30	83.59	4761000	42.93	1.41	0.23	12.92	1.10	2.01	0.00
35	15.32	85.33	4772000	43.20	1.40	0.23	13.00	1.09	2.03	0.00
36	15.34	87.40	4744000	43.68	1.37	0.22	13.07	1.09	2.06	0.00
37	15.37	89.16	4678000	44.19	1.32	0.23	13.09	1.09	2.09	0.00
38	15.39	90.41	4612000	44.58	1.28	0.23	13.04	1.09	2.12	0.00
39	15.40	91.82	4632000	44.79	1.25	0.23	12.92	1.09	2.13	0.00
40	15.41	94.06	4767000	44.85	1.24	0.24	12.76	1.11	2.14	0.00
41	15.42	96.61	4888000	44.78	1.25	0.24	12.58	1.13	2.13	0.00
42	15.43	98.09	4858000	44.57	1.26	0.24	12.44	1.14	2.13	0.00
43	15.44	97.95	4680000	44.38	1.25	0.24	12.38	1.16	2.13	0.00
44	15.48	97.84	4484000	44.75	1.23	0.24	12.50	1.20	2.15	0.00
45	15.55	100.98	4425000	46.28	1.21	0.24	12.90	1.24	2.18	0.00
46	15.67	107.16	4555000	48.26	1.23	0.23	13.51	1.27	2.21	0.00
47	15.78	113.06	4859000	49.43	1.27	0.23	14.11	1.29	2.23	0.00
48	15.86	115.05	5075000	49.45	1.28	0.22	14.47	1.27	2.22	0.00
49	15.91	111.81	5077000	48.57	1.26	0.21	14.56	1.23	2.21	0.00
50	15.91	104.78	4965000	47.31	1.24	0.21	14.45	1.16	2.19	0.00
51	15.88	96.79	4847000	46.24	1.23	0.20	14.31	1.09	2.17	0.00
52	15.83	90.71	4797000	45.70	1.23	0.20	14.23	1.04	2.17	0.00
53	15.76	87.72	4817000	45.49	1.24	0.19	14.24	1.03	2.17	0.00
54	15.70	86.86	4850000	45.40	1.25	0.19	14.29	1.03	2.18	0.00
55	15.66	86.69	4860000	45.30	1.27	0.19	14.32	1.04	2.19	0.00
56	15.63	86.69	4873000	45.11	1.30	0.20	14.30	1.05	2.20	0.00
57	15.60	87.01	4913000	44.89	1.33	0.20	14.23	1.05	2.20	0.00
58	15.57	88.00	4969000	44.76	1.35	0.20	14.14	1.06	2.21	0.00
59	15.55	89.72	5009000	44.86	1.35	0.21	14.05	1.07	2.22	0.00
60	15.54	91.75	5004000	45.17	1.32	0.21	13.96	1.07	2.23	0.00
61	15.53	93.45	4955000	45.56	1.27	0.21	13.83	1.08	2.25	0.00

62	15.52	94.65	4896000	45.88	1.24	0.22	13.64	1.09	2.26	0.00
63	15.50	96.14	4921000	46.05	1.22	0.22	13.39	1.10	2.27	0.00
64	15.49	98.49	5049000	46.13	1.23	0.22	13.11	1.13	2.26	0.00
65	15.49	101.06	5155000	46.09	1.25	0.22	12.85	1.16	2.24	0.00
66	15.49	102.41	5110000	45.91	1.26	0.22	12.64	1.18	2.23	0.00
67	15.50	101.89	4907000	45.74	1.26	0.22	12.53	1.21	2.22	0.00
68	15.53	101.28	4681000	46.13	1.24	0.22	12.61	1.24	2.23	0.00
69	15.60	103.67	4582000	47.58	1.22	0.22	12.97	1.28	2.26	0.00
70	15.71	109.14	4680000	49.47	1.24	0.22	13.56	1.31	2.28	0.00
71	15.82	114.13	4940000	50.51	1.27	0.21	14.12	1.33	2.28	0.00
72	15.90	114.81	5100000	50.30	1.27	0.21	14.43	1.30	2.27	0.00
73	15.93	110.46	5053000	49.26	1.25	0.21	14.47	1.25	2.25	0.00
74	15.93	102.66	4902000	47.90	1.22	0.20	14.33	1.18	2.22	0.00
75	15.90	94.26	4757000	46.79	1.21	0.20	14.18	1.11	2.20	0.00
76	15.85	87.66	4676000	46.13	1.21	0.20	14.10	1.06	2.19	0.00
77	15.79	84.17	4668000	45.82	1.22	0.20	14.11	1.04	2.19	0.00
78	15.74	82.64	4667000	45.61	1.23	0.20	14.16	1.04	2.19	0.00
79	15.70	81.81	4639000	45.34	1.26	0.20	14.18	1.04	2.19	0.00
80	15.67	81.17	4612000	44.97	1.29	0.20	14.15	1.04	2.19	0.00
81	15.65	80.97	4612000	44.54	1.33	0.21	14.07	1.04	2.18	0.00
82	15.63	81.57	4627000	44.21	1.35	0.21	13.97	1.04	2.18	0.00
83	15.62	83.00	4620000	44.11	1.35	0.21	13.86	1.04	2.18	0.00
84	15.61	84.69	4559000	44.23	1.31	0.22	13.75	1.04	2.19	0.00
85	15.60	85.96	4445000	44.40	1.25	0.22	13.59	1.04	2.20	0.00
86	15.60	86.42	4315000	44.45	1.21	0.22	13.35	1.03	2.21	0.00
87	15.59	86.63	4262000	44.33	1.17	0.22	13.05	1.04	2.20	0.00
88	15.58	87.21	4328000	44.05	1.16	0.22	12.71	1.05	2.18	0.00
89	15.58	87.64	4366000	43.64	1.15	0.22	12.39	1.05	2.15	0.00
90	15.59	86.96	4245000	43.07	1.14	0.22	12.12	1.05	2.11	0.00
91	15.59	84.81	3956000	42.47	1.12	0.22	11.96	1.05	2.09	0.00
92	15.61	82.49	3645000	42.20	1.09	0.22	11.97	1.06	2.08	0.00
93	15.66	82.11	3467000	42.63	1.07	0.22	12.21	1.07	2.07	0.00
94	15.73	83.41	3438000	43.32	1.07	0.21	12.61	1.07	2.07	0.00
95	15.81	84.41	3509000	43.54	1.09	0.21	13.02	1.06	2.07	0.00
96	15.87	83.31	3533000	43.19	1.10	0.20	13.33	1.04	2.05	0.00

97	15.92	79.67	3458000	42.50	1.09	0.20	13.51	1.00	2.04	0.00
98	15.95	74.71	3357000	41.76	1.09	0.19	13.62	0.95	2.03	0.00
99	15.96	69.83	3284000	41.21	1.10	0.19	13.72	0.91	2.02	0.00
100	15.96	66.29	3267000	40.94	1.11	0.18	13.86	0.88	2.02	0.00
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
<b>Caudal alto - Concentración mínima ( Salitre Tratamiento Secundario - Canoas Tratamiento Secundario – Tratamiento Primario (50-50, desinfección))</b>										
Hora	Temp. (°C)	SST	CT	DBO	NO	NO3	NH4	PO	INP	OD
1	15.25	112.12	18322000	58.40	2.81	0.25	12.18	2.19	1.22	4.27
2	15.25	109.76	15209000	56.73	2.64	0.41	12.08	2.05	1.31	0.19
3	15.25	109.01	14660000	56.38	2.60	0.30	12.18	2.02	1.33	0.00
4	15.25	106.31	12868000	55.22	2.49	0.49	12.03	1.93	1.39	0.00
5	15.25	105.71	12581000	54.96	2.47	0.48	12.05	1.92	1.40	0.00
6	15.25	105.03	12145000	54.64	2.44	0.45	12.08	1.89	1.42	0.00
7	15.25	102.54	10620000	53.46	2.33	0.33	12.21	1.81	1.47	0.00
8	15.25	101.46	10110000	52.94	2.28	0.25	12.29	1.77	1.50	0.00
9	15.25	101.24	10021000	52.83	2.27	0.23	12.32	1.76	1.50	0.00
10	15.25	100.83	9706000	52.57	2.25	0.25	12.30	1.74	1.51	0.00
11	15.25	99.06	8519000	51.42	2.13	0.32	12.25	1.66	1.57	0.00
12	15.25	96.20	7015000	49.54	1.94	0.35	12.25	1.53	1.66	0.00
13	15.25	93.76	6143000	47.91	1.79	0.31	12.31	1.43	1.72	0.00
14	15.26	92.39	5803000	46.80	1.71	0.26	12.38	1.37	1.77	0.00
15	15.26	92.67	5785000	46.10	1.67	0.23	12.43	1.35	1.79	0.00
16	15.28	94.77	5960000	45.69	1.68	0.21	12.47	1.35	1.81	0.00
17	15.30	97.77	6134000	45.46	1.71	0.19	12.50	1.37	1.82	0.00
18	15.33	99.97	6141000	45.30	1.73	0.19	12.52	1.39	1.83	0.00
19	15.34	100.65	5968000	45.30	1.74	0.18	12.56	1.41	1.85	0.00
20	15.38	101.36	5754000	45.87	1.73	0.18	12.70	1.45	1.88	0.00
21	15.44	104.96	5620000	47.43	1.70	0.19	13.01	1.49	1.92	0.00
22	15.52	111.00	5587000	49.19	1.68	0.22	13.45	1.51	1.96	0.00
23	15.60	116.17	5666000	49.93	1.67	0.24	13.79	1.51	1.98	0.00
24	15.64	116.93	5656000	49.32	1.62	0.26	13.87	1.47	1.98	0.00
25	15.63	112.73	5479000	47.83	1.54	0.28	13.68	1.40	1.97	0.00

26	15.59	104.91	5234000	46.03	1.46	0.29	13.32	1.31	1.95	0.00
27	15.52	96.16	5020000	44.53	1.40	0.30	12.95	1.22	1.94	0.00
28	15.44	89.28	4895000	43.68	1.36	0.31	12.71	1.16	1.93	0.00
29	15.37	85.50	4851000	43.29	1.34	0.31	12.62	1.13	1.94	0.00
30	15.31	83.83	4821000	43.13	1.33	0.30	12.65	1.12	1.95	0.00
31	15.28	82.99	4775000	43.03	1.34	0.29	12.72	1.11	1.96	0.00
32	15.28	82.56	4740000	42.94	1.36	0.27	12.79	1.10	1.98	0.00
33	15.28	82.64	4739000	42.87	1.39	0.25	12.86	1.10	1.99	0.00
34	15.30	83.59	4761000	42.93	1.41	0.23	12.92	1.10	2.01	0.00
35	15.32	85.33	4772000	43.20	1.40	0.23	13.00	1.09	2.03	0.00
36	15.34	87.40	4744000	43.68	1.37	0.22	13.07	1.09	2.06	0.00
37	15.37	89.16	4678000	44.19	1.32	0.23	13.09	1.09	2.09	0.00
38	15.39	90.41	4612000	44.58	1.28	0.23	13.04	1.09	2.12	0.00
39	15.40	91.82	4632000	44.79	1.25	0.23	12.92	1.09	2.13	0.00
40	15.41	94.06	4767000	44.85	1.24	0.24	12.76	1.11	2.14	0.00
41	15.42	96.61	4888000	44.78	1.25	0.24	12.58	1.13	2.13	0.00
42	15.43	98.09	4858000	44.57	1.26	0.24	12.44	1.14	2.13	0.00
43	15.44	97.95	4680000	44.38	1.25	0.24	12.38	1.16	2.13	0.00
44	15.48	97.84	4484000	44.75	1.23	0.24	12.50	1.20	2.15	0.00
45	15.55	100.98	4425000	46.28	1.21	0.24	12.90	1.24	2.18	0.00
46	15.67	107.16	4555000	48.26	1.23	0.23	13.51	1.27	2.21	0.00
47	15.78	113.06	4859000	49.43	1.27	0.23	14.11	1.29	2.23	0.00
48	15.86	115.05	5075000	49.45	1.28	0.22	14.47	1.27	2.22	0.00
49	15.91	111.81	5077000	48.57	1.26	0.21	14.56	1.23	2.21	0.00
50	15.91	104.78	4965000	47.31	1.24	0.21	14.45	1.16	2.19	0.00
51	15.88	96.79	4847000	46.24	1.23	0.20	14.31	1.09	2.17	0.00
52	15.83	90.71	4797000	45.70	1.23	0.20	14.23	1.04	2.17	0.00
53	15.76	87.72	4817000	45.49	1.24	0.19	14.24	1.03	2.17	0.00
54	15.70	86.86	4850000	45.40	1.25	0.19	14.29	1.03	2.18	0.00
55	15.66	86.69	4860000	45.30	1.27	0.19	14.32	1.04	2.19	0.00
56	15.63	86.69	4873000	45.11	1.30	0.20	14.30	1.05	2.20	0.00
57	15.60	87.01	4913000	44.89	1.33	0.20	14.23	1.05	2.20	0.00
58	15.57	88.00	4969000	44.76	1.35	0.20	14.14	1.06	2.21	0.00
59	15.55	89.72	5009000	44.86	1.35	0.21	14.05	1.07	2.22	0.00
60	15.54	91.75	5004000	45.17	1.32	0.21	13.96	1.07	2.23	0.00

61	15.53	93.45	4955000	45.56	1.27	0.21	13.83	1.08	2.25	0.00
62	15.52	94.65	4896000	45.88	1.24	0.22	13.64	1.09	2.26	0.00
63	15.50	96.14	4921000	46.05	1.22	0.22	13.39	1.10	2.27	0.00
64	15.49	98.49	5049000	46.13	1.23	0.22	13.11	1.13	2.26	0.00
65	15.49	101.06	5155000	46.09	1.25	0.22	12.85	1.16	2.24	0.00
66	15.49	102.41	5110000	45.91	1.26	0.22	12.64	1.18	2.23	0.00
67	15.50	101.89	4907000	45.74	1.26	0.22	12.53	1.21	2.22	0.00
68	15.53	101.28	4681000	46.13	1.24	0.22	12.61	1.24	2.23	0.00
69	15.60	103.67	4582000	47.58	1.22	0.22	12.97	1.28	2.26	0.00
70	15.71	109.14	4680000	49.47	1.24	0.22	13.56	1.31	2.28	0.00
71	15.82	114.13	4940000	50.51	1.27	0.21	14.12	1.33	2.28	0.00
72	15.90	114.81	5100000	50.30	1.27	0.21	14.43	1.30	2.27	0.00
73	15.93	110.46	5053000	49.26	1.25	0.21	14.47	1.25	2.25	0.00
74	15.93	102.66	4902000	47.90	1.22	0.20	14.33	1.18	2.22	0.00
75	15.90	94.26	4757000	46.79	1.21	0.20	14.18	1.11	2.20	0.00
76	15.85	87.66	4676000	46.13	1.21	0.20	14.10	1.06	2.19	0.00
77	15.79	84.17	4668000	45.82	1.22	0.20	14.11	1.04	2.19	0.00
78	15.74	82.64	4667000	45.61	1.23	0.20	14.16	1.04	2.19	0.00
79	15.70	81.81	4639000	45.34	1.26	0.20	14.18	1.04	2.19	0.00
80	15.67	81.17	4612000	44.97	1.29	0.20	14.15	1.04	2.19	0.00
81	15.65	80.97	4612000	44.54	1.33	0.21	14.07	1.04	2.18	0.00
82	15.63	81.57	4627000	44.21	1.35	0.21	13.97	1.04	2.18	0.00
83	15.62	83.00	4620000	44.11	1.35	0.21	13.86	1.04	2.18	0.00
84	15.61	84.69	4559000	44.23	1.31	0.22	13.75	1.04	2.19	0.00
85	15.60	85.96	4445000	44.40	1.25	0.22	13.59	1.04	2.20	0.00
86	15.60	86.42	4315000	44.45	1.21	0.22	13.35	1.03	2.21	0.00
87	15.59	86.63	4262000	44.33	1.17	0.22	13.05	1.04	2.20	0.00
88	15.58	87.21	4328000	44.05	1.16	0.22	12.71	1.05	2.18	0.00
89	15.58	87.64	4366000	43.64	1.15	0.22	12.39	1.05	2.15	0.00
90	15.59	86.96	4245000	43.07	1.14	0.22	12.12	1.05	2.11	0.00
91	15.59	84.81	3956000	42.47	1.12	0.22	11.96	1.05	2.09	0.00
92	15.61	82.49	3645000	42.20	1.09	0.22	11.97	1.06	2.08	0.00
93	15.66	82.11	3467000	42.63	1.07	0.22	12.21	1.07	2.07	0.00
94	15.73	83.41	3438000	43.32	1.07	0.21	12.61	1.07	2.07	0.00
95	15.81	84.41	3509000	43.54	1.09	0.21	13.02	1.06	2.07	0.00



96	15.87	83.31	3533000	43.19	1.10	0.20	13.33	1.04	2.05	0.00
97	15.92	79.67	3458000	42.50	1.09	0.20	13.51	1.00	2.04	0.00
98	15.95	74.71	3357000	41.76	1.09	0.19	13.62	0.95	2.03	0.00
99	15.96	69.83	3284000	41.21	1.10	0.19	13.72	0.91	2.02	0.00
100	15.96	66.29	3267000	40.94	1.11	0.18	13.86	0.88	2.02	0.00
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
<b>Caudal bajo - Concentración máxima (Condición actual)</b>										
Hora	Temp. (°C)	SST	CT	DBO	NO	NO3	NH4	PO	INP	OD
1	17.96	83.54	10195000	158.62	9.99	0.52	26.68	15.45	4.54	1.47
2	17.96	79.22	7571000	151.41	9.07	0.50	26.92	14.33	5.50	1.47
3	17.96	78.70	7400000	150.53	8.97	0.49	26.96	14.27	5.61	1.47
4	17.96	76.61	6673000	148.17	8.71	0.48	27.02	14.27	5.88	1.47
5	17.96	73.14	5662000	144.25	8.30	0.47	27.13	13.84	6.31	1.47
6	17.96	71.86	5408000	142.77	8.15	0.46	27.18	13.70	6.46	1.47
7	17.96	71.63	5380000	142.49	8.12	0.45	27.19	13.20	6.49	1.47
8	17.96	70.21	4937000	140.70	7.93	0.45	27.24	13.03	6.69	1.47
9	17.96	67.23	4148000	136.91	7.53	0.44	27.34	12.17	7.10	1.47
10	17.96	65.20	3739000	134.24	7.26	0.42	27.42	11.81	7.38	1.47
11	17.96	64.61	3665000	133.41	7.19	0.42	27.44	11.49	7.46	1.47
12	17.96	64.47	3650000	133.20	7.17	0.42	27.45	11.05	7.48	1.47
13	17.96	64.26	3590000	132.91	7.14	0.42	27.46	10.86	7.51	1.47
14	17.96	62.85	3204000	130.83	6.92	0.41	27.51	10.85	7.77	1.47
15	17.96	59.33	2476000	125.42	6.38	0.40	27.65	10.71	8.39	1.47
16	17.96	55.13	1866000	118.73	5.75	0.38	27.81	10.32	9.11	1.47
17	17.96	51.64	1556000	112.77	5.25	0.35	27.95	10.01	9.69	1.47
18	17.96	49.48	1436000	108.42	4.94	0.33	28.06	9.87	10.08	1.47
19	17.97	48.59	1394000	105.38	4.80	0.31	28.13	9.82	10.34	1.47
20	17.97	48.63	1381000	103.26	4.78	0.30	28.18	9.74	10.50	1.47
21	17.97	48.97	1375000	101.76	4.83	0.29	28.22	9.42	10.62	1.47
22	17.98	49.15	1371000	100.84	4.87	0.29	28.27	8.71	10.71	1.47
23	18.00	49.26	1366000	100.71	4.87	0.29	28.38	7.84	10.80	1.47
24	18.06	50.13	1370000	102.15	4.82	0.29	28.67	7.07	10.89	1.47

25	18.15	52.05	1397000	104.76	4.80	0.28	29.13	6.53	10.98	1.47
26	18.24	54.38	1458000	107.07	4.83	0.28	29.63	6.19	11.04	1.47
27	18.31	55.76	1513000	107.67	4.82	0.28	29.94	6.00	11.06	1.47
28	18.34	55.36	1509000	106.47	4.71	0.28	29.93	5.91	11.04	1.47
29	18.32	52.95	1430000	103.82	4.53	0.28	29.63	5.87	11.01	1.47
30	18.27	49.34	1314000	100.64	4.33	0.28	29.20	5.88	11.01	1.47
31	18.20	45.75	1210000	97.81	4.18	0.27	28.81	5.91	11.04	1.47
32	18.12	43.07	1141000	95.77	4.06	0.27	28.57	5.97	11.09	1.47
33	18.05	41.55	1109000	94.49	3.98	0.26	28.51	6.01	11.18	1.47
34	18.01	40.82	1106000	93.81	3.91	0.26	28.58	6.01	11.27	1.47
35	17.98	40.53	1120000	93.59	3.86	0.26	28.76	5.94	11.36	1.47
36	17.97	40.47	1132000	93.67	3.83	0.25	29.03	5.81	11.44	1.47
37	17.97	40.48	1121000	93.83	3.82	0.25	29.35	5.65	11.52	1.47
38	17.97	40.46	1088000	93.93	3.83	0.24	29.69	5.51	11.59	1.47
39	17.98	40.34	1051000	93.86	3.87	0.24	29.97	5.41	11.66	1.47
40	18.00	40.14	1029000	93.55	3.95	0.24	30.16	5.32	11.73	1.47
41	18.02	40.13	1025000	93.01	4.03	0.23	30.26	5.23	11.80	1.47
42	18.05	40.83	1032000	92.45	4.11	0.23	30.33	5.14	11.89	1.47
43	18.09	42.65	1043000	92.13	4.20	0.23	30.42	5.05	12.01	1.47
44	18.13	45.36	1052000	92.18	4.27	0.23	30.57	4.97	12.18	1.47
45	18.18	48.15	1050000	92.59	4.32	0.22	30.73	4.89	12.41	1.47
46	18.23	50.03	1039000	93.26	4.32	0.22	30.86	4.82	12.68	1.47
47	18.29	51.08	1022000	94.48	4.24	0.22	30.98	4.75	12.95	1.47
48	18.38	52.03	1008000	96.72	4.10	0.22	31.16	4.70	13.20	1.47
49	18.48	53.56	1021000	99.72	3.97	0.22	31.45	4.65	13.36	1.47
50	18.57	55.12	1072000	101.82	3.90	0.21	31.73	4.64	13.40	1.47
51	18.61	55.51	1121000	101.75	3.80	0.21	31.80	4.64	13.33	1.47
52	18.61	53.91	1125000	99.37	3.60	0.20	31.51	4.66	13.17	1.47
53	18.56	50.48	1084000	95.47	3.37	0.20	30.91	4.70	12.95	1.47
54	18.47	46.12	1025000	91.20	3.16	0.20	30.15	4.75	12.71	1.47
55	18.35	42.04	974000	87.63	3.03	0.20	29.40	4.82	12.48	1.47
56	18.24	39.12	952000	85.23	2.96	0.20	28.80	4.88	12.29	1.47
57	18.14	37.58	962000	84.12	2.94	0.20	28.40	4.90	12.14	1.47
58	18.08	37.05	994000	84.10	2.97	0.20	28.19	4.86	12.03	1.47
59	18.05	37.07	1033000	84.90	3.01	0.20	28.17	4.76	11.95	1.47

---

60	18.06	37.40	1062000	86.30	3.08	0.20	28.37	4.62	11.93	1.47
61	18.11	37.86	1064000	87.97	3.16	0.20	28.76	4.50	11.94	1.47
62	18.18	38.29	1039000	89.66	3.26	0.20	29.31	4.44	12.00	1.47
63	18.28	38.61	1006000	91.15	3.38	0.20	29.93	4.43	12.09	1.47
64	18.40	38.82	985000	92.27	3.53	0.20	30.58	4.45	12.21	1.47
65	18.52	39.17	977000	92.98	3.67	0.20	31.23	4.47	12.35	1.47
66	18.66	40.16	978000	93.43	3.80	0.20	31.89	4.48	12.53	1.47
67	18.80	42.26	982000	93.84	3.92	0.20	32.58	4.47	12.74	1.47
68	18.93	45.13	982000	94.33	4.02	0.20	33.30	4.45	13.01	1.47
69	19.05	47.99	974000	94.89	4.08	0.20	33.97	4.43	13.32	1.47
70	19.15	49.90	957000	95.46	4.09	0.20	34.51	4.40	13.66	1.47
71	19.23	50.90	936000	96.35	4.01	0.20	34.93	4.37	13.98	1.47
72	19.32	51.75	921000	98.15	3.86	0.20	35.29	4.34	14.26	1.47
73	19.39	53.09	932000	100.50	3.74	0.20	35.63	4.32	14.42	1.47
74	19.44	54.41	977000	101.93	3.67	0.20	35.84	4.32	14.45	1.47
75	19.43	54.57	1022000	101.22	3.57	0.20	35.74	4.34	14.34	1.47
76	19.36	52.82	1026000	98.31	3.39	0.19	35.20	4.37	14.12	1.47
77	19.23	49.31	990000	94.01	3.17	0.19	34.30	4.41	13.82	1.47
78	19.06	44.96	937000	89.47	2.98	0.19	33.21	4.47	13.49	1.47
79	18.87	40.89	892000	85.64	2.85	0.19	32.11	4.54	13.18	1.47
80	18.68	38.01	874000	83.09	2.80	0.19	31.16	4.60	12.89	1.47
81	18.52	36.43	885000	81.82	2.79	0.19	30.41	4.63	12.65	1.47
82	18.40	35.82	916000	81.66	2.82	0.19	29.88	4.60	12.46	1.47
83	18.33	35.79	953000	82.39	2.88	0.19	29.58	4.51	12.32	1.47
84	18.29	36.06	982000	83.73	2.95	0.19	29.53	4.39	12.22	1.47
85	18.30	36.46	986000	85.39	3.03	0.19	29.71	4.30	12.18	1.47
86	18.34	36.86	963000	87.09	3.14	0.19	30.08	4.25	12.19	1.47
87	18.41	37.16	934000	88.61	3.27	0.19	30.56	4.26	12.24	1.47
88	18.51	37.37	917000	89.80	3.42	0.19	31.10	4.29	12.32	1.47
89	18.62	37.73	913000	90.59	3.57	0.19	31.66	4.32	12.43	1.47
90	18.74	38.73	917000	91.12	3.70	0.20	32.26	4.34	12.58	1.47
91	18.86	40.79	924000	91.61	3.83	0.20	32.90	4.34	12.77	1.47
92	18.98	43.66	928000	92.20	3.93	0.20	33.57	4.33	13.01	1.47
93	19.09	46.49	924000	92.85	3.99	0.20	34.20	4.31	13.30	1.47
94	19.18	48.48	913000	93.52	4.00	0.20	34.71	4.29	13.61	1.47

95	19.25	49.48	898000	94.48	3.92	0.20	35.09	4.26	13.92	1.47
96	19.33	50.41	889000	96.33	3.79	0.20	35.40	4.24	14.17	1.47
97	19.39	51.80	905000	98.72	3.68	0.20	35.70	4.22	14.32	1.47
98	19.42	53.24	956000	100.29	3.62	0.20	35.88	4.22	14.34	1.47
99	19.41	53.55	1006000	99.75	3.53	0.19	35.75	4.23	14.22	1.47
100	19.33	51.99	1017000	97.08	3.36	0.19	35.21	4.26	14.00	1.47
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

**Caudal bajo - Concentración máxima (Salitre Tratamiento Secundario - Canoas  
Tratamiento Primario)**

Hora	Temp.(°C)	SST	CT	DBO	NO	NO3	NH4	PO	INP	OD
1	17.96	83.54	10195000	158.62	9.99	0.52	26.68	15.46	4.54	1.47
2	17.96	79.22	7571000	151.41	9.07	0.50	26.92	14.04	5.50	0.00
3	17.96	78.70	7400000	150.53	8.97	0.49	26.96	13.88	5.61	0.00
4	17.96	76.61	6673000	148.17	8.71	0.48	27.02	13.48	5.88	0.00
5	17.96	73.14	5662000	144.25	8.30	0.47	27.13	12.84	6.31	0.00
6	17.96	71.86	5408000	142.77	8.15	0.46	27.18	12.61	6.46	0.00
7	17.96	71.63	5380000	142.49	8.12	0.45	27.19	12.58	6.49	0.00
8	17.96	70.21	4937000	140.70	7.93	0.45	27.24	12.28	6.69	0.00
9	17.96	67.23	4148000	136.91	7.53	0.44	27.34	11.66	7.10	0.00
10	17.96	65.20	3739000	134.24	7.26	0.42	27.42	11.25	7.38	0.00
11	17.96	64.61	3665000	133.41	7.19	0.42	27.44	11.13	7.46	0.00
12	17.96	64.47	3650000	133.20	7.17	0.42	27.45	11.10	7.48	0.00
13	17.96	64.26	3590000	132.91	7.14	0.42	27.46	11.05	7.51	0.00
14	17.96	62.85	3204000	130.83	6.92	0.41	27.51	10.68	7.77	0.00
15	17.96	59.33	2476000	125.42	6.38	0.40	27.65	9.77	8.39	0.00
16	17.96	55.13	1866000	118.73	5.75	0.38	27.81	8.71	9.11	0.00
17	17.96	51.64	1556000	112.77	5.25	0.35	27.95	7.86	9.69	0.00
18	17.96	49.48	1436000	108.42	4.94	0.33	28.06	7.31	10.08	0.00
19	17.97	48.59	1394000	105.38	4.80	0.31	28.13	7.00	10.34	0.00
20	17.97	48.63	1381000	103.26	4.78	0.30	28.18	6.85	10.50	0.00
21	17.97	48.97	1375000	101.76	4.83	0.29	28.22	6.79	10.62	0.00
22	17.98	49.15	1371000	100.84	4.87	0.29	28.27	6.79	10.71	0.00
23	18.00	49.26	1366000	100.71	4.87	0.29	28.38	6.83	10.80	0.00

---

24	18.06	50.13	1370000	102.15	4.82	0.29	28.67	6.92	10.89	0.00
25	18.15	52.05	1397000	104.76	4.80	0.28	29.13	7.01	10.98	0.00
26	18.24	54.38	1458000	107.07	4.83	0.28	29.63	7.08	11.04	0.00
27	18.31	55.76	1513000	107.67	4.82	0.28	29.94	7.06	11.06	0.00
28	18.34	55.36	1509000	106.47	4.71	0.28	29.93	6.95	11.04	0.00
29	18.32	52.95	1430000	103.82	4.53	0.28	29.63	6.73	11.01	0.00
30	18.27	49.34	1314000	100.64	4.33	0.28	29.20	6.43	11.01	0.00
31	18.20	45.75	1210000	97.81	4.18	0.27	28.81	6.14	11.04	0.00
32	18.12	43.07	1141000	95.77	4.06	0.27	28.57	5.89	11.09	0.00
33	18.05	41.55	1109000	94.49	3.98	0.26	28.51	5.70	11.18	0.00
34	18.01	40.82	1106000	93.81	3.91	0.26	28.58	5.55	11.27	0.00
35	17.98	40.53	1120000	93.59	3.86	0.26	28.76	5.43	11.36	0.00
36	17.97	40.47	1132000	93.67	3.83	0.25	29.03	5.33	11.44	0.00
37	17.97	40.48	1121000	93.83	3.82	0.25	29.35	5.26	11.52	0.00
38	17.97	40.46	1088000	93.93	3.83	0.24	29.69	5.22	11.59	0.00
39	17.98	40.34	1051000	93.86	3.87	0.24	29.97	5.18	11.66	0.00
40	18.00	40.14	1029000	93.55	3.95	0.24	30.16	5.16	11.73	0.00
41	18.02	40.13	1025000	93.01	4.03	0.23	30.26	5.16	11.80	0.00
42	18.05	40.83	1032000	92.45	4.11	0.23	30.33	5.17	11.89	0.00
43	18.09	42.65	1043000	92.13	4.20	0.23	30.42	5.21	12.01	0.00
44	18.13	45.36	1052000	92.18	4.27	0.23	30.57	5.27	12.18	0.00
45	18.18	48.15	1050000	92.59	4.32	0.22	30.73	5.34	12.41	0.00
46	18.23	50.03	1039000	93.26	4.32	0.22	30.86	5.42	12.68	0.00
47	18.29	51.08	1022000	94.48	4.24	0.22	30.98	5.52	12.95	0.00
48	18.38	52.03	1008000	96.72	4.10	0.22	31.16	5.64	13.20	0.00
49	18.48	53.56	1021000	99.72	3.97	0.22	31.45	5.74	13.36	0.00
50	18.57	55.12	1072000	101.82	3.90	0.21	31.73	5.77	13.40	0.00
51	18.61	55.51	1121000	101.75	3.80	0.21	31.80	5.72	13.33	0.00
52	18.61	53.91	1125000	99.37	3.60	0.20	31.51	5.56	13.17	0.00
53	18.56	50.48	1084000	95.47	3.37	0.20	30.91	5.33	12.95	0.00
54	18.47	46.12	1025000	91.20	3.16	0.20	30.15	5.08	12.71	0.00
55	18.35	42.04	974000	87.63	3.03	0.20	29.40	4.87	12.48	0.00
56	18.24	39.12	952000	85.23	2.96	0.20	28.80	4.74	12.29	0.00
57	18.14	37.58	962000	84.12	2.94	0.20	28.40	4.68	12.14	0.00
58	18.08	37.05	994000	84.10	2.97	0.20	28.19	4.66	12.03	0.00

59	18.05	37.07	1033000	84.90	3.01	0.20	28.17	4.65	11.95	0.00
60	18.06	37.40	1062000	86.30	3.08	0.20	28.37	4.66	11.93	0.00
61	18.11	37.86	1064000	87.97	3.16	0.20	28.76	4.67	11.94	0.00
62	18.18	38.29	1039000	89.66	3.26	0.20	29.31	4.69	12.00	0.00
63	18.28	38.61	1006000	91.15	3.38	0.20	29.93	4.71	12.09	0.00
64	18.40	38.82	985000	92.27	3.53	0.20	30.58	4.73	12.21	0.00
65	18.52	39.17	977000	92.98	3.67	0.20	31.23	4.76	12.35	0.00
66	18.66	40.16	978000	93.43	3.80	0.20	31.89	4.80	12.53	0.00
67	18.80	42.26	982000	93.84	3.92	0.20	32.58	4.86	12.74	0.00
68	18.93	45.13	982000	94.33	4.02	0.20	33.30	4.94	13.01	0.00
69	19.05	47.99	974000	94.89	4.08	0.20	33.97	5.02	13.32	0.00
70	19.15	49.90	957000	95.46	4.09	0.20	34.51	5.11	13.66	0.00
71	19.23	50.90	936000	96.35	4.01	0.20	34.93	5.22	13.98	0.00
72	19.32	51.75	921000	98.15	3.86	0.20	35.29	5.34	14.26	0.00
73	19.39	53.09	932000	100.50	3.74	0.20	35.63	5.44	14.42	0.00
74	19.44	54.41	977000	101.93	3.67	0.20	35.84	5.48	14.45	0.00
75	19.43	54.57	1022000	101.22	3.57	0.20	35.74	5.43	14.34	0.00
76	19.36	52.82	1026000	98.31	3.39	0.19	35.20	5.29	14.12	0.00
77	19.23	49.31	990000	94.01	3.17	0.19	34.30	5.08	13.82	0.00
78	19.06	44.96	937000	89.47	2.98	0.19	33.21	4.86	13.49	0.00
79	18.87	40.89	892000	85.64	2.85	0.19	32.11	4.67	13.18	0.00
80	18.68	38.01	874000	83.09	2.80	0.19	31.16	4.56	12.89	0.00
81	18.52	36.43	885000	81.82	2.79	0.19	30.41	4.52	12.65	0.00
82	18.40	35.82	916000	81.66	2.82	0.19	29.88	4.51	12.46	0.00
83	18.33	35.79	953000	82.39	2.88	0.19	29.58	4.51	12.32	0.00
84	18.29	36.06	982000	83.73	2.95	0.19	29.53	4.53	12.22	0.00
85	18.30	36.46	986000	85.39	3.03	0.19	29.71	4.54	12.18	0.00
86	18.34	36.86	963000	87.09	3.14	0.19	30.08	4.56	12.19	0.00
87	18.41	37.16	934000	88.61	3.27	0.19	30.56	4.59	12.24	0.00
88	18.51	37.37	917000	89.80	3.42	0.19	31.10	4.61	12.32	0.00
89	18.62	37.73	913000	90.59	3.57	0.19	31.66	4.64	12.43	0.00
90	18.74	38.73	917000	91.12	3.70	0.20	32.26	4.68	12.58	0.00
91	18.86	40.79	924000	91.61	3.83	0.20	32.90	4.74	12.77	0.00
92	18.98	43.66	928000	92.20	3.93	0.20	33.57	4.82	13.01	0.00
93	19.09	46.49	924000	92.85	3.99	0.20	34.20	4.90	13.30	0.00

94	19.18	48.48	913000	93.52	4.00	0.20	34.71	4.99	13.61	0.00
95	19.25	49.48	898000	94.48	3.92	0.20	35.09	5.10	13.92	0.00
96	19.33	50.41	889000	96.33	3.79	0.20	35.40	5.22	14.17	0.00
97	19.39	51.80	905000	98.72	3.68	0.20	35.70	5.33	14.32	0.00
98	19.42	53.24	956000	100.29	3.62	0.20	35.88	5.38	14.34	0.00
99	19.41	53.55	1006000	99.75	3.53	0.19	35.75	5.34	14.22	0.00
100	19.33	51.99	1017000	97.08	3.36	0.19	35.21	5.21	14.00	0.00
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
<b>Caudal bajo - Concentración máxima (Salitre Tratamiento Secundario - Canoas Tratamiento Secundario (desinfección))</b>										
Hora	Temp. (°C)	SST	CT	DBO	NO	NO3	NH4	PO	INP	OD
1	17.96	83.54	10195000	158.62	9.99	0.52	26.68	15.46	4.54	1.47
2	17.96	79.22	7571000	151.41	9.07	0.50	26.92	14.04	5.50	0.00
3	17.96	78.70	7400000	150.53	8.97	0.49	26.96	13.88	5.61	0.00
4	17.96	76.61	6673000	148.17	8.71	0.48	27.02	13.48	5.88	0.00
5	17.96	73.14	5662000	144.25	8.30	0.47	27.13	12.84	6.31	0.00
6	17.96	71.86	5408000	142.77	8.15	0.46	27.18	12.61	6.46	0.00
7	17.96	71.63	5380000	142.49	8.12	0.45	27.19	12.58	6.49	0.00
8	17.96	70.21	4937000	140.70	7.93	0.45	27.24	12.28	6.69	0.00
9	17.96	67.23	4148000	136.91	7.53	0.44	27.34	11.66	7.10	0.00
10	17.96	65.20	3739000	134.24	7.26	0.42	27.42	11.25	7.38	0.00
11	17.96	64.61	3665000	133.41	7.19	0.42	27.44	11.13	7.46	0.00
12	17.96	64.47	3650000	133.20	7.17	0.42	27.45	11.10	7.48	0.00
13	17.96	64.26	3590000	132.91	7.14	0.42	27.46	11.05	7.51	0.00
14	17.96	62.85	3204000	130.83	6.92	0.41	27.51	10.68	7.77	0.00
15	17.96	59.33	2476000	125.42	6.38	0.40	27.65	9.77	8.39	0.00
16	17.96	55.13	1866000	118.73	5.75	0.38	27.81	8.71	9.11	0.00
17	17.96	51.64	1556000	112.77	5.25	0.35	27.95	7.86	9.69	0.00
18	17.96	49.48	1436000	108.42	4.94	0.33	28.06	7.31	10.08	0.00
19	17.97	48.59	1394000	105.38	4.80	0.31	28.13	7.00	10.34	0.00
20	17.97	48.63	1381000	103.26	4.78	0.30	28.18	6.85	10.50	0.00
21	17.97	48.97	1375000	101.76	4.83	0.29	28.22	6.79	10.62	0.00
22	17.98	49.15	1371000	100.84	4.87	0.29	28.27	6.79	10.71	0.00

23	18.00	49.26	1366000	100.71	4.87	0.29	28.38	6.83	10.80	0.00
24	18.06	50.13	1370000	102.15	4.82	0.29	28.67	6.92	10.89	0.00
25	18.15	52.05	1397000	104.76	4.80	0.28	29.13	7.01	10.98	0.00
26	18.24	54.38	1458000	107.07	4.83	0.28	29.63	7.08	11.04	0.00
27	18.31	55.76	1513000	107.67	4.82	0.28	29.94	7.06	11.06	0.00
28	18.34	55.36	1509000	106.47	4.71	0.28	29.93	6.95	11.04	0.00
29	18.32	52.95	1430000	103.82	4.53	0.28	29.63	6.73	11.01	0.00
30	18.27	49.34	1314000	100.64	4.33	0.28	29.20	6.43	11.01	0.00
31	18.20	45.75	1210000	97.81	4.18	0.27	28.81	6.14	11.04	0.00
32	18.12	43.07	1141000	95.77	4.06	0.27	28.57	5.89	11.09	0.00
33	18.05	41.55	1109000	94.49	3.98	0.26	28.51	5.70	11.18	0.00
34	18.01	40.82	1106000	93.81	3.91	0.26	28.58	5.55	11.27	0.00
35	17.98	40.53	1120000	93.59	3.86	0.26	28.76	5.43	11.36	0.00
36	17.97	40.47	1132000	93.67	3.83	0.25	29.03	5.33	11.44	0.00
37	17.97	40.48	1121000	93.83	3.82	0.25	29.35	5.26	11.52	0.00
38	17.97	40.46	1088000	93.93	3.83	0.24	29.69	5.22	11.59	0.00
39	17.98	40.34	1051000	93.86	3.87	0.24	29.97	5.18	11.66	0.00
40	18.00	40.14	1029000	93.55	3.95	0.24	30.16	5.16	11.73	0.00
41	18.02	40.13	1025000	93.01	4.03	0.23	30.26	5.16	11.80	0.00
42	18.05	40.83	1032000	92.45	4.11	0.23	30.33	5.17	11.89	0.00
43	18.09	42.65	1043000	92.13	4.20	0.23	30.42	5.21	12.01	0.00
44	18.13	45.36	1052000	92.18	4.27	0.23	30.57	5.27	12.18	0.00
45	18.18	48.15	1050000	92.59	4.32	0.22	30.73	5.34	12.41	0.00
46	18.23	50.03	1039000	93.26	4.32	0.22	30.86	5.42	12.68	0.00
47	18.29	51.08	1022000	94.48	4.24	0.22	30.98	5.52	12.95	0.00
48	18.38	52.03	1008000	96.72	4.10	0.22	31.16	5.64	13.20	0.00
49	18.48	53.56	1021000	99.72	3.97	0.22	31.45	5.74	13.36	0.00
50	18.57	55.12	1072000	101.82	3.90	0.21	31.73	5.77	13.40	0.00
51	18.61	55.51	1121000	101.75	3.80	0.21	31.80	5.72	13.33	0.00
52	18.61	53.91	1125000	99.37	3.60	0.20	31.51	5.56	13.17	0.00
53	18.56	50.48	1084000	95.47	3.37	0.20	30.91	5.33	12.95	0.00
54	18.47	46.12	1025000	91.20	3.16	0.20	30.15	5.08	12.71	0.00
55	18.35	42.04	974000	87.63	3.03	0.20	29.40	4.87	12.48	0.00
56	18.24	39.12	952000	85.23	2.96	0.20	28.80	4.74	12.29	0.00
57	18.14	37.58	962000	84.12	2.94	0.20	28.40	4.68	12.14	0.00



---

58	18.08	37.05	994000	84.10	2.97	0.20	28.19	4.66	12.03	0.00
59	18.05	37.07	1033000	84.90	3.01	0.20	28.17	4.65	11.95	0.00
60	18.06	37.40	1062000	86.30	3.08	0.20	28.37	4.66	11.93	0.00
61	18.11	37.86	1064000	87.97	3.16	0.20	28.76	4.67	11.94	0.00
62	18.18	38.29	1039000	89.66	3.26	0.20	29.31	4.69	12.00	0.00
63	18.28	38.61	1006000	91.15	3.38	0.20	29.93	4.71	12.09	0.00
64	18.40	38.82	985000	92.27	3.53	0.20	30.58	4.73	12.21	0.00
65	18.52	39.17	977000	92.98	3.67	0.20	31.23	4.76	12.35	0.00
66	18.66	40.16	978000	93.43	3.80	0.20	31.89	4.80	12.53	0.00
67	18.80	42.26	982000	93.84	3.92	0.20	32.58	4.86	12.74	0.00
68	18.93	45.13	982000	94.33	4.02	0.20	33.30	4.94	13.01	0.00
69	19.05	47.99	974000	94.89	4.08	0.20	33.97	5.02	13.32	0.00
70	19.15	49.90	957000	95.46	4.09	0.20	34.51	5.11	13.66	0.00
71	19.23	50.90	936000	96.35	4.01	0.20	34.93	5.22	13.98	0.00
72	19.32	51.75	921000	98.15	3.86	0.20	35.29	5.34	14.26	0.00
73	19.39	53.09	932000	100.50	3.74	0.20	35.63	5.44	14.42	0.00
74	19.44	54.41	977000	101.93	3.67	0.20	35.84	5.48	14.45	0.00
75	19.43	54.57	1022000	101.22	3.57	0.20	35.74	5.43	14.34	0.00
76	19.36	52.82	1026000	98.31	3.39	0.19	35.20	5.29	14.12	0.00
77	19.23	49.31	990000	94.01	3.17	0.19	34.30	5.08	13.82	0.00
78	19.06	44.96	937000	89.47	2.98	0.19	33.21	4.86	13.49	0.00
79	18.87	40.89	892000	85.64	2.85	0.19	32.11	4.67	13.18	0.00
80	18.68	38.01	874000	83.09	2.80	0.19	31.16	4.56	12.89	0.00
81	18.52	36.43	885000	81.82	2.79	0.19	30.41	4.52	12.65	0.00
82	18.40	35.82	916000	81.66	2.82	0.19	29.88	4.51	12.46	0.00
83	18.33	35.79	953000	82.39	2.88	0.19	29.58	4.51	12.32	0.00
84	18.29	36.06	982000	83.73	2.95	0.19	29.53	4.53	12.22	0.00
85	18.30	36.46	986000	85.39	3.03	0.19	29.71	4.54	12.18	0.00
86	18.34	36.86	963000	87.09	3.14	0.19	30.08	4.56	12.19	0.00
87	18.41	37.16	934000	88.61	3.27	0.19	30.56	4.59	12.24	0.00
88	18.51	37.37	917000	89.80	3.42	0.19	31.10	4.61	12.32	0.00
89	18.62	37.73	913000	90.59	3.57	0.19	31.66	4.64	12.43	0.00
90	18.74	38.73	917000	91.12	3.70	0.20	32.26	4.68	12.58	0.00
91	18.86	40.79	924000	91.61	3.83	0.20	32.90	4.74	12.77	0.00
92	18.98	43.66	928000	92.20	3.93	0.20	33.57	4.82	13.01	0.00

93	19.09	46.49	924000	92.85	3.99	0.20	34.20	4.90	13.30	0.00
94	19.18	48.48	913000	93.52	4.00	0.20	34.71	4.99	13.61	0.00
95	19.25	49.48	898000	94.48	3.92	0.20	35.09	5.10	13.92	0.00
96	19.33	50.41	889000	96.33	3.79	0.20	35.40	5.22	14.17	0.00
97	19.39	51.80	905000	98.72	3.68	0.20	35.70	5.33	14.32	0.00
98	19.42	53.24	956000	100.29	3.62	0.20	35.88	5.38	14.34	0.00
99	19.41	53.55	1006000	99.75	3.53	0.19	35.75	5.34	14.22	0.00
100	19.33	51.99	1017000	97.08	3.36	0.19	35.21	5.21	14.00	0.00
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
<b>Caudal bajo - Concentración máxima (Salitre Tratamiento Secundario - Canoas Tratamiento Secundario - sin Tratamiento (50-50, desinfección))</b>										
Hora	Temp. (°C)	SST	CT	DBO	NO	NO3	NH4	PO	INP	OD
1	17.96	83.54	10195000	158.62	9.99	0.52	26.68	15.46	4.54	1.47
2	17.96	79.22	7571000	151.41	9.07	0.50	26.92	14.04	5.50	0.00
3	17.96	78.70	7400000	150.53	8.97	0.49	26.96	13.88	5.61	0.00
4	17.96	76.61	6673000	148.17	8.71	0.48	27.02	13.48	5.88	0.00
5	17.96	73.14	5662000	144.25	8.30	0.47	27.13	12.84	6.31	0.00
6	17.96	71.86	5408000	142.77	8.15	0.46	27.18	12.61	6.46	0.00
7	17.96	71.63	5380000	142.49	8.12	0.45	27.19	12.58	6.49	0.00
8	17.96	70.21	4937000	140.70	7.93	0.45	27.24	12.28	6.69	0.00
9	17.96	67.23	4148000	136.91	7.53	0.44	27.34	11.66	7.10	0.00
10	17.96	65.20	3739000	134.24	7.26	0.42	27.42	11.25	7.38	0.00
11	17.96	64.61	3665000	133.41	7.19	0.42	27.44	11.13	7.46	0.00
12	17.96	64.47	3650000	133.20	7.17	0.42	27.45	11.10	7.48	0.00
13	17.96	64.26	3590000	132.91	7.14	0.42	27.46	11.05	7.51	0.00
14	17.96	62.85	3204000	130.83	6.92	0.41	27.51	10.68	7.77	0.00
15	17.96	59.33	2476000	125.42	6.38	0.40	27.65	9.77	8.39	0.00
16	17.96	55.13	1866000	118.73	5.75	0.38	27.81	8.71	9.11	0.00
17	17.96	51.64	1556000	112.77	5.25	0.35	27.95	7.86	9.69	0.00
18	17.96	49.48	1436000	108.42	4.94	0.33	28.06	7.31	10.08	0.00
19	17.97	48.59	1394000	105.38	4.80	0.31	28.13	7.00	10.34	0.00
20	17.97	48.63	1381000	103.26	4.78	0.30	28.18	6.85	10.50	0.00
21	17.97	48.97	1375000	101.76	4.83	0.29	28.22	6.79	10.62	0.00

---

22	17.98	49.15	1371000	100.84	4.87	0.29	28.27	6.79	10.71	0.00
23	18.00	49.26	1366000	100.71	4.87	0.29	28.38	6.83	10.80	0.00
24	18.06	50.13	1370000	102.15	4.82	0.29	28.67	6.92	10.89	0.00
25	18.15	52.05	1397000	104.76	4.80	0.28	29.13	7.01	10.98	0.00
26	18.24	54.38	1458000	107.07	4.83	0.28	29.63	7.08	11.04	0.00
27	18.31	55.76	1513000	107.67	4.82	0.28	29.94	7.06	11.06	0.00
28	18.34	55.36	1509000	106.47	4.71	0.28	29.93	6.95	11.04	0.00
29	18.32	52.95	1430000	103.82	4.53	0.28	29.63	6.73	11.01	0.00
30	18.27	49.34	1314000	100.64	4.33	0.28	29.20	6.43	11.01	0.00
31	18.20	45.75	1210000	97.81	4.18	0.27	28.81	6.14	11.04	0.00
32	18.12	43.07	1141000	95.77	4.06	0.27	28.57	5.89	11.09	0.00
33	18.05	41.55	1109000	94.49	3.98	0.26	28.51	5.70	11.18	0.00
34	18.01	40.82	1106000	93.81	3.91	0.26	28.58	5.55	11.27	0.00
35	17.98	40.53	1120000	93.59	3.86	0.26	28.76	5.43	11.36	0.00
36	17.97	40.47	1132000	93.67	3.83	0.25	29.03	5.33	11.44	0.00
37	17.97	40.48	1121000	93.83	3.82	0.25	29.35	5.26	11.52	0.00
38	17.97	40.46	1088000	93.93	3.83	0.24	29.69	5.22	11.59	0.00
39	17.98	40.34	1051000	93.86	3.87	0.24	29.97	5.18	11.66	0.00
40	18.00	40.14	1029000	93.55	3.95	0.24	30.16	5.16	11.73	0.00
41	18.02	40.13	1025000	93.01	4.03	0.23	30.26	5.16	11.80	0.00
42	18.05	40.83	1032000	92.45	4.11	0.23	30.33	5.17	11.89	0.00
43	18.09	42.65	1043000	92.13	4.20	0.23	30.42	5.21	12.01	0.00
44	18.13	45.36	1052000	92.18	4.27	0.23	30.57	5.27	12.18	0.00
45	18.18	48.15	1050000	92.59	4.32	0.22	30.73	5.34	12.41	0.00
46	18.23	50.03	1039000	93.26	4.32	0.22	30.86	5.42	12.68	0.00
47	18.29	51.08	1022000	94.48	4.24	0.22	30.98	5.52	12.95	0.00
48	18.38	52.03	1008000	96.72	4.10	0.22	31.16	5.64	13.20	0.00
49	18.48	53.56	1021000	99.72	3.97	0.22	31.45	5.74	13.36	0.00
50	18.57	55.12	1072000	101.82	3.90	0.21	31.73	5.77	13.40	0.00
51	18.61	55.51	1121000	101.75	3.80	0.21	31.80	5.72	13.33	0.00
52	18.61	53.91	1125000	99.37	3.60	0.20	31.51	5.56	13.17	0.00
53	18.56	50.48	1084000	95.47	3.37	0.20	30.91	5.33	12.95	0.00
54	18.47	46.12	1025000	91.20	3.16	0.20	30.15	5.08	12.71	0.00
55	18.35	42.04	974000	87.63	3.03	0.20	29.40	4.87	12.48	0.00
56	18.24	39.12	952000	85.23	2.96	0.20	28.80	4.74	12.29	0.00

57	18.14	37.58	962000	84.12	2.94	0.20	28.40	4.68	12.14	0.00
58	18.08	37.05	994000	84.10	2.97	0.20	28.19	4.66	12.03	0.00
59	18.05	37.07	1033000	84.90	3.01	0.20	28.17	4.65	11.95	0.00
60	18.06	37.40	1062000	86.30	3.08	0.20	28.37	4.66	11.93	0.00
61	18.11	37.86	1064000	87.97	3.16	0.20	28.76	4.67	11.94	0.00
62	18.18	38.29	1039000	89.66	3.26	0.20	29.31	4.69	12.00	0.00
63	18.28	38.61	1006000	91.15	3.38	0.20	29.93	4.71	12.09	0.00
64	18.40	38.82	985000	92.27	3.53	0.20	30.58	4.73	12.21	0.00
65	18.52	39.17	977000	92.98	3.67	0.20	31.23	4.76	12.35	0.00
66	18.66	40.16	978000	93.43	3.80	0.20	31.89	4.80	12.53	0.00
67	18.80	42.26	982000	93.84	3.92	0.20	32.58	4.86	12.74	0.00
68	18.93	45.13	982000	94.33	4.02	0.20	33.30	4.94	13.01	0.00
69	19.05	47.99	974000	94.89	4.08	0.20	33.97	5.02	13.32	0.00
70	19.15	49.90	957000	95.46	4.09	0.20	34.51	5.11	13.66	0.00
71	19.23	50.90	936000	96.35	4.01	0.20	34.93	5.22	13.98	0.00
72	19.32	51.75	921000	98.15	3.86	0.20	35.29	5.34	14.26	0.00
73	19.39	53.09	932000	100.50	3.74	0.20	35.63	5.44	14.42	0.00
74	19.44	54.41	977000	101.93	3.67	0.20	35.84	5.48	14.45	0.00
75	19.43	54.57	1022000	101.22	3.57	0.20	35.74	5.43	14.34	0.00
76	19.36	52.82	1026000	98.31	3.39	0.19	35.20	5.29	14.12	0.00
77	19.23	49.31	990000	94.01	3.17	0.19	34.30	5.08	13.82	0.00
78	19.06	44.96	937000	89.47	2.98	0.19	33.21	4.86	13.49	0.00
79	18.87	40.89	892000	85.64	2.85	0.19	32.11	4.67	13.18	0.00
80	18.68	38.01	874000	83.09	2.80	0.19	31.16	4.56	12.89	0.00
81	18.52	36.43	885000	81.82	2.79	0.19	30.41	4.52	12.65	0.00
82	18.40	35.82	916000	81.66	2.82	0.19	29.88	4.51	12.46	0.00
83	18.33	35.79	953000	82.39	2.88	0.19	29.58	4.51	12.32	0.00
84	18.29	36.06	982000	83.73	2.95	0.19	29.53	4.53	12.22	0.00
85	18.30	36.46	986000	85.39	3.03	0.19	29.71	4.54	12.18	0.00
86	18.34	36.86	963000	87.09	3.14	0.19	30.08	4.56	12.19	0.00
87	18.41	37.16	934000	88.61	3.27	0.19	30.56	4.59	12.24	0.00
88	18.51	37.37	917000	89.80	3.42	0.19	31.10	4.61	12.32	0.00
89	18.62	37.73	913000	90.59	3.57	0.19	31.66	4.64	12.43	0.00
90	18.74	38.73	917000	91.12	3.70	0.20	32.26	4.68	12.58	0.00
91	18.86	40.79	924000	91.61	3.83	0.20	32.90	4.74	12.77	0.00

92	18.98	43.66	928000	92.20	3.93	0.20	33.57	4.82	13.01	0.00
93	19.09	46.49	924000	92.85	3.99	0.20	34.20	4.90	13.30	0.00
94	19.18	48.48	913000	93.52	4.00	0.20	34.71	4.99	13.61	0.00
95	19.25	49.48	898000	94.48	3.92	0.20	35.09	5.10	13.92	0.00
96	19.33	50.41	889000	96.33	3.79	0.20	35.40	5.22	14.17	0.00
97	19.39	51.80	905000	98.72	3.68	0.20	35.70	5.33	14.32	0.00
98	19.42	53.24	956000	100.29	3.62	0.20	35.88	5.38	14.34	0.00
99	19.41	53.55	1006000	99.75	3.53	0.19	35.75	5.34	14.22	0.00
100	19.33	51.99	1017000	97.08	3.36	0.19	35.21	5.21	14.00	0.00
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

**Caudal alto - Concentración mínima (Salitre Tratamiento Secundario - Canoas  
Tratamiento Secundario – Tratamiento primario (50-50, desinfección).**

Hora	Temp.(°C)	SST	CT	DBO	NO	NO3	NH4	PO	INP	OD
1	17.96	83.54	10195000	158.62	9.99	0.52	26.68	15.46	4.54	1.47
2	17.96	79.22	7571000	151.41	9.07	0.50	26.92	14.04	5.50	0.00
3	17.96	78.70	7400000	150.53	8.97	0.49	26.96	13.88	5.61	0.00
4	17.96	76.61	6673000	148.17	8.71	0.48	27.02	13.48	5.88	0.00
5	17.96	73.14	5662000	144.25	8.30	0.47	27.13	12.84	6.31	0.00
6	17.96	71.86	5408000	142.77	8.15	0.46	27.18	12.61	6.46	0.00
7	17.96	71.63	5380000	142.49	8.12	0.45	27.19	12.58	6.49	0.00
8	17.96	70.21	4937000	140.70	7.93	0.45	27.24	12.28	6.69	0.00
9	17.96	67.23	4148000	136.91	7.53	0.44	27.34	11.66	7.10	0.00
10	17.96	65.20	3739000	134.24	7.26	0.42	27.42	11.25	7.38	0.00
11	17.96	64.61	3665000	133.41	7.19	0.42	27.44	11.13	7.46	0.00
12	17.96	64.47	3650000	133.20	7.17	0.42	27.45	11.10	7.48	0.00
13	17.96	64.26	3590000	132.91	7.14	0.42	27.46	11.05	7.51	0.00
14	17.96	62.85	3204000	130.83	6.92	0.41	27.51	10.68	7.77	0.00
15	17.96	59.33	2476000	125.42	6.38	0.40	27.65	9.77	8.39	0.00
16	17.96	55.13	1866000	118.73	5.75	0.38	27.81	8.71	9.11	0.00
17	17.96	51.64	1556000	112.77	5.25	0.35	27.95	7.86	9.69	0.00
18	17.96	49.48	1436000	108.42	4.94	0.33	28.06	7.31	10.08	0.00
19	17.97	48.59	1394000	105.38	4.80	0.31	28.13	7.00	10.34	0.00
20	17.97	48.63	1381000	103.26	4.78	0.30	28.18	6.85	10.50	0.00

21	17.97	48.97	1375000	101.76	4.83	0.29	28.22	6.79	10.62	0.00
22	17.98	49.15	1371000	100.84	4.87	0.29	28.27	6.79	10.71	0.00
23	18.00	49.26	1366000	100.71	4.87	0.29	28.38	6.83	10.80	0.00
24	18.06	50.13	1370000	102.15	4.82	0.29	28.67	6.92	10.89	0.00
25	18.15	52.05	1397000	104.76	4.80	0.28	29.13	7.01	10.98	0.00
26	18.24	54.38	1458000	107.07	4.83	0.28	29.63	7.08	11.04	0.00
27	18.31	55.76	1513000	107.67	4.82	0.28	29.94	7.06	11.06	0.00
28	18.34	55.36	1509000	106.47	4.71	0.28	29.93	6.95	11.04	0.00
29	18.32	52.95	1430000	103.82	4.53	0.28	29.63	6.73	11.01	0.00
30	18.27	49.34	1314000	100.64	4.33	0.28	29.20	6.43	11.01	0.00
31	18.20	45.75	1210000	97.81	4.18	0.27	28.81	6.14	11.04	0.00
32	18.12	43.07	1141000	95.77	4.06	0.27	28.57	5.89	11.09	0.00
33	18.05	41.55	1109000	94.49	3.98	0.26	28.51	5.70	11.18	0.00
34	18.01	40.82	1106000	93.81	3.91	0.26	28.58	5.55	11.27	0.00
35	17.98	40.53	1120000	93.59	3.86	0.26	28.76	5.43	11.36	0.00
36	17.97	40.47	1132000	93.67	3.83	0.25	29.03	5.33	11.44	0.00
37	17.97	40.48	1121000	93.83	3.82	0.25	29.35	5.26	11.52	0.00
38	17.97	40.46	1088000	93.93	3.83	0.24	29.69	5.22	11.59	0.00
39	17.98	40.34	1051000	93.86	3.87	0.24	29.97	5.18	11.66	0.00
40	18.00	40.14	1029000	93.55	3.95	0.24	30.16	5.16	11.73	0.00
41	18.02	40.13	1025000	93.01	4.03	0.23	30.26	5.16	11.80	0.00
42	18.05	40.83	1032000	92.45	4.11	0.23	30.33	5.17	11.89	0.00
43	18.09	42.65	1043000	92.13	4.20	0.23	30.42	5.21	12.01	0.00
44	18.13	45.36	1052000	92.18	4.27	0.23	30.57	5.27	12.18	0.00
45	18.18	48.15	1050000	92.59	4.32	0.22	30.73	5.34	12.41	0.00
46	18.23	50.03	1039000	93.26	4.32	0.22	30.86	5.42	12.68	0.00
47	18.29	51.08	1022000	94.48	4.24	0.22	30.98	5.52	12.95	0.00
48	18.38	52.03	1008000	96.72	4.10	0.22	31.16	5.64	13.20	0.00
49	18.48	53.56	1021000	99.72	3.97	0.22	31.45	5.74	13.36	0.00
50	18.57	55.12	1072000	101.82	3.90	0.21	31.73	5.77	13.40	0.00
51	18.61	55.51	1121000	101.75	3.80	0.21	31.80	5.72	13.33	0.00
52	18.61	53.91	1125000	99.37	3.60	0.20	31.51	5.56	13.17	0.00
53	18.56	50.48	1084000	95.47	3.37	0.20	30.91	5.33	12.95	0.00
54	18.47	46.12	1025000	91.20	3.16	0.20	30.15	5.08	12.71	0.00
55	18.35	42.04	974000	87.63	3.03	0.20	29.40	4.87	12.48	0.00

---

56	18.24	39.12	952000	85.23	2.96	0.20	28.80	4.74	12.29	0.00
57	18.14	37.58	962000	84.12	2.94	0.20	28.40	4.68	12.14	0.00
58	18.08	37.05	994000	84.10	2.97	0.20	28.19	4.66	12.03	0.00
59	18.05	37.07	1033000	84.90	3.01	0.20	28.17	4.65	11.95	0.00
60	18.06	37.40	1062000	86.30	3.08	0.20	28.37	4.66	11.93	0.00
61	18.11	37.86	1064000	87.97	3.16	0.20	28.76	4.67	11.94	0.00
62	18.18	38.29	1039000	89.66	3.26	0.20	29.31	4.69	12.00	0.00
63	18.28	38.61	1006000	91.15	3.38	0.20	29.93	4.71	12.09	0.00
64	18.40	38.82	985000	92.27	3.53	0.20	30.58	4.73	12.21	0.00
65	18.52	39.17	977000	92.98	3.67	0.20	31.23	4.76	12.35	0.00
66	18.66	40.16	978000	93.43	3.80	0.20	31.89	4.80	12.53	0.00
67	18.80	42.26	982000	93.84	3.92	0.20	32.58	4.86	12.74	0.00
68	18.93	45.13	982000	94.33	4.02	0.20	33.30	4.94	13.01	0.00
69	19.05	47.99	974000	94.89	4.08	0.20	33.97	5.02	13.32	0.00
70	19.15	49.90	957000	95.46	4.09	0.20	34.51	5.11	13.66	0.00
71	19.23	50.90	936000	96.35	4.01	0.20	34.93	5.22	13.98	0.00
72	19.32	51.75	921000	98.15	3.86	0.20	35.29	5.34	14.26	0.00
73	19.39	53.09	932000	100.50	3.74	0.20	35.63	5.44	14.42	0.00
74	19.44	54.41	977000	101.93	3.67	0.20	35.84	5.48	14.45	0.00
75	19.43	54.57	1022000	101.22	3.57	0.20	35.74	5.43	14.34	0.00
76	19.36	52.82	1026000	98.31	3.39	0.19	35.20	5.29	14.12	0.00
77	19.23	49.31	990000	94.01	3.17	0.19	34.30	5.08	13.82	0.00
78	19.06	44.96	937000	89.47	2.98	0.19	33.21	4.86	13.49	0.00
79	18.87	40.89	892000	85.64	2.85	0.19	32.11	4.67	13.18	0.00
80	18.68	38.01	874000	83.09	2.80	0.19	31.16	4.56	12.89	0.00
81	18.52	36.43	885000	81.82	2.79	0.19	30.41	4.52	12.65	0.00
82	18.40	35.82	916000	81.66	2.82	0.19	29.88	4.51	12.46	0.00
83	18.33	35.79	953000	82.39	2.88	0.19	29.58	4.51	12.32	0.00
84	18.29	36.06	982000	83.73	2.95	0.19	29.53	4.53	12.22	0.00
85	18.30	36.46	986000	85.39	3.03	0.19	29.71	4.54	12.18	0.00
86	18.34	36.86	963000	87.09	3.14	0.19	30.08	4.56	12.19	0.00
87	18.41	37.16	934000	88.61	3.27	0.19	30.56	4.59	12.24	0.00
88	18.51	37.37	917000	89.80	3.42	0.19	31.10	4.61	12.32	0.00
89	18.62	37.73	913000	90.59	3.57	0.19	31.66	4.64	12.43	0.00
90	18.74	38.73	917000	91.12	3.70	0.20	32.26	4.68	12.58	0.00

[illegible]



## B. Código programa Visual Basic y MATLAB

- El programa elaborado en Visual Basic se muestra a continuación:

```
Public DatoConcentraciones2(153, 1020) As Long
Public DatoConcentraciones3(153, 1020) As Long
Public Datovelocidadesx(154, 1020) As Double
Public Datovelocidadesy(153, 1025) As Double
Public Promediox As Double
Public Promedioy As Double
Public Distancia As Double
Public Consecutivo As String
Public Consecutivo1 As String
Public Contador As Double
Public Const PI As Double = 3.14159265358979
Sub IniciaAcad()
On Error Resume Next
Set Acad = GetObject(, "Autocad.Application")
If Err <> 0 Then
MsgBox "No se puede cargar AutoCAD.", vbExclamation: End: End If
On Error Resume Next
Set AcadDoc = Acad.ActiveDocument
If Err <> 0 Then
MsgBox "No se puede cargar AutoCAD.", vbExclamation: End: End If
ThisWorkbook.Application.WindowState = xlMinimized
Acad.Application.WindowState = acMax
End Sub
```

```
Sub TerminaAcad()  
Acad.Application.WindowState = acMin  
ThisWorkbook.Application.WindowState = xlMaximized  
End Sub  
  
Sub Concentraciones2()  
Dim ConsecutivoInicial As Integer  
Dim ConsecutivoFinal As Integer  
ConsecutivoInicial = 1  
ConsecutivoFinal = 10  
For ConsecutivoInicial = 1 To ConsecutivoFinal  
Dim LineofText As String  
Dim Dato As String  
Dim Fila As Integer  
Consecutivo = Format(ConsecutivoInicial, "000")  
Open "C:\Documentos\UN\Tesis Sergio\Copia de Modelo1\P2O " & Consecutivo & ".TXT"  
For Input As #1  
Fila = 1  
Do While Not EOF(1)  
Line Input #1, LineofText  
For i = 0 To 152  
DatoConcentraciones2(1 + i, Fila) = Cdbl(Mid(LineofText, 3 + 15 * i, 13))  
Next  
Fila = Fila + 1  
Loop  
Close #1  
Call Dibuja_Concentraciones2  
Next  
End Sub  
  
Sub Dibuja_Concentraciones2()  
IniciaAcad  
Dim colores(10) As Integer  
Dim valormaximo, valor As Double  
Dim ssetObj As AcadSelectionSet
```

---

```
colores(0) = 170
colores(1) = 150
colores(2) = 130
colores(3) = 110
colores(4) = 90
colores(5) = 70
colores(6) = 60
colores(7) = 50
colores(8) = 30
colores(9) = 10
valormaximo = 300
For i = 1 To 153
For j = 1 To 204 * 1
Insercion(0) = (i - 1) * 20
Insercion(1) = (j - 1) * 20
Insercion(2) = 0
If DatoConcentraciones2(i, j) > 0 Then
Set Bloque = AcadDoc.ModelSpace.InsertBlock(Insercion, "rec", 1, 1, 1, 0)
Bloque.Color = colores(Int(DatoConcentraciones2(i, j) / (valormaximo / 1.001)))
End If
Next
Next
Acad.Application.ZoomExtents
Set ssetObj = AcadDoc.SelectionSets.Add("SSET-" & Consecutivo)
ssetObj.Select acSelectionSetAll
AcadDoc.Export AcadDoc.Path & "\P2O " & Consecutivo, "WMF", ssetObj
AcadDoc.SendCommand ("E ALL ")
TerminaAcad
End Sub
Sub Velocidades()
Dim ConsecutivoInicial As Integer
Dim ConsecutivoFinal As Integer
ConsecutivoInicial = 9
```

```
ConsecutivoFinal = 10
For a = ConsecutivoInicial To ConsecutivoFinal
Dim LineofText As String
Dim Dato As String
Dim Fila As Integer
Dim Fila1 As Integer
Consecutivo = Format(a, "000")
Open "C:\Documentos\UN\Coherens\Graficador\VELX  " & Consecutivo & ".TXT" For
Input As #1
Fila = 1
Do While Not EOF(1)
Line Input #1, LineofText
For i = 0 To 153
Datovelocidadesx(1 + i, Fila) = CDbI(Mid(LineofText, 3 + 15 * i, 13))
Next
Fila = Fila + 1
Loop
Close #1
Open "C:\Documentos\UN\Coherens\Graficador\VELY  " & Consecutivo & ".TXT" For
Input As #2
Fila1 = 1
Do While Not EOF(2)
Line Input #2, LineofText
For j = 0 To 152
Datovelocidadesy(1 + j, Fila1) = CDbI(Mid(LineofText, 3 + 15 * j, 13))
Next
Fila1 = Fila1 + 1
Close #2
Call DibujaVelocidades
Loop
Next
End Sub
Sub DibujaVelocidades()
```

---

```
IniciaAcad
Dim colores(10) As Integer
Dim valormaximo, valor As Double
Dim ssetObj As AcadSelectionSet
valormaximo = 0.01122
'Grafico 5 capas
Contador = 1
Do While Contador <= 204
For i = 0 To 152
For j = 1 To 204 * 5
Promediox = (Datovelocidadesx(i, j) + Datovelocidadesx(i + 1, j)) / 2
Promedioy = (Datovelocidadesy(i, j) + Datovelocidadesy(i, j + 1)) / 2
valor = Sqr(Promediox ^ 2 + Promedioy ^ 2)
Angulo = 0
If valor <> 0 Then
On Error Resume Next
Angulo = Atn(Promedioy / Promediox)
End If
Insercion(0) = (i - 1) * 20
Insercion(1) = (j - 1) * 20
Insercion(2) = 0
If valor > 0 Then
Set Bloque = AcadDoc.ModelSpace.InsertBlock(Insercion, "flecha", 1, 1, 1, Angulo)
Bloque.Color = colores(Int(valor / (valormaximo / 10)))
End If
Next
Next
j = j + 1
Loop
Acad.Application.ZoomExtents
Set ssetObj = AcadDoc.SelectionSets.Add("SSET-" & Consecutivo)
ssetObj.Select acSelectionSetAll
AcadDoc.Export AcadDoc.Path & "\VEL" & Consecutivo, "WMF", ssetObj
```

```
AcadDoc.SendCommand ("E ALL ")
TerminaAcad
End Sub.
```

- El programa elaborado en MATLAB se muestra a continuación:

[illegible]

[illegible]

xlabel('Tiempo (hr)');

Legend('Entrada','Salida');



## Bibliografía

Barreto I., Ezzatti p., Fossati M., Estudio inicial del modelo MOHID, {Marzo, 2011}, disponible en: <http://www.fing.edu.uy/inco/pedeciba/bibliote/reptec/TR0910.pdf>

Blumberg, A, Mellor, G. 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. Three-dimensional coastal ocean models. American Geophysical Union. {Septiembre, 2010}, disponible en: [http://www.stevens.edu/ses/ceoe/fileadmin/ceoe/pdf/alan\\_publications/AFB032.pdf](http://www.stevens.edu/ses/ceoe/fileadmin/ceoe/pdf/alan_publications/AFB032.pdf)

Camacho, L.A. (1991). Implementación de un modelo hidrodinámico y de transporte de contaminantes bidimensional y su aplicación al caso de la Ciénaga Grande de Santa Marta. Tesis de Magíster en Ingeniería Civil, Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia.

Camacho, L. A., y Lees, M. J. (1999). Discrete multilinear-lag for channel routing, Journal of Hydrology, 226, 30-47.

Camacho, L.A. (2001). Development of a hierarchical modelling framework for solute transport under unsteady flow conditions in rivers. Tesis de doctorado, Imperial College London. Londres, Inglaterra.

Camacho, L.A., (2009). Notas de clase, Modelación matemática y física en hidráulica. Curso electivo, Maestría en Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia.

Camacho, L.A., (2010). Notas de clase, Modelación matemática en hidrología. Curso electivo, Maestría en Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia.

Caldwell J. y Doyle, M. (1994) Sediment oxygen demand in the lower Willamette river, Oregon. US Geological Survey.

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA - CVC Y LA UNIVERSIDAD DEL VALLE – [1997] Proyecto de Modelación del Río Cauca-PMC

Chapra, S.C. (1997) *Surface water-quality modeling*. New York, EE.UU.: Mc Graw Hill.

Chapra, S.C., Martin, J.L. Camacho R.A 2011. LAKE2K: A Modeling Framework for Simulating Lake Water Quality (Version 2.0): Documentation and Users Manual.

Descripción de MOHID, Sitio Web MOHID, {Febrero, 2011} disponible en: [http://maretec.mohid.com/PublicData/Products/Manuals/Mohid\\_Description.pdf](http://maretec.mohid.com/PublicData/Products/Manuals/Mohid_Description.pdf)

Díaz H. (2004) Modelación hidrodinámica del embalse del Muña, Tesis de Magister Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, director L. A. Camacho.EEB - GRUCON (2005) Plan de seguimiento y monitoreo del embalse del Muña. Monitoreo llevado a cabo durante 2004 y 2005.

Di Toro D (2001). Sediment flux modeling. John Wiley & Sons. Inc.

Di Toro, AD.M. and Fitzpatrick, J.J. (1993). Chesapeake Bay Sediment Flux Model. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Tech. Report EL-93-2.

EMGESA S.A. ESP., Universidad de los Andes. (1998). Saneamiento ambiental del embalse del Muña. Bogotá, Colombia.

EMGESA EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ EMPRESA DE ENERGIA DE BOGOTÁ (Octubre 2004) Definición y Valoración Técnica de Alternativas de Sectorización, Operación y Manejo del Embalse del Muña- Propuesta técnica y económica.

EMGESA EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ EMPRESA DE ENERGIA DE BOGOTÁ (Mayo 2005) Definición y Valoración Técnica de Alternativas de Sectorización, Operación y Manejo del Embalse del Muña-Resumen para expertos

EMGESA EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ EMPRESA DE ENERGIA DE BOGOTÁ (Junio 2005) Definición y valoración técnica de alternativas para mitigar el impacto ambiental del Embalse del Muña – Informe final mesa de expertos 2005

EMGESA Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá Empresa de Energía de Bogotá (Agosto 2005) Definición y Valoración Técnica de Alternativas de Sectorización,

Operación y Manejo y Modelación Hidrodinámica y de Calidad del Agua del embalse del Muña Informe Final (Fase II)

EMGESA; Empresa de Acueducto Y Alcantarillado de Bogotá; Empresa de Energía De Bogotá; Universidad de los Andes (noviembre 2006) Definición y valorización técnica de alternativas de sectorización, operación y manejo y modelación hidrodinámica y de calidad del agua del embalse del Muña (Fase III)

Empresa de Energía de Bogotá (EEB). (1994) Estudio General del Embalse del Muña. Bogotá, Colombia.

Estupiñan H. (2010), Metodología para modelar el sistema de drenaje incorporando los procesos de acumulación y lavado en una cuenca urbana. Campus universidad nacional de Colombia - sede Bogotá, Tesis de Maestría en Recursos Hidráulicos, director E. A. Rodríguez.

Georg Umgiessera, Patrick J. Luytenb, Sandro Carniel (2002). Exploring the thermal cycle of the Northern North Sea area using a 3-D circulation model: the example of PROVESS NNS station, Journal of Sea Research 48 (2002) 271– 286.

Hamrick, J. 1992. A three-dimensional environmental fluid dynamics computer code: theoretical and computational aspects. Virginia Institute of Marine Science. Gloucester Point.

López F., Estudio de Paralelización del modelo hidrodinámico COHERENS para sistemas multicore mediante OpenMP, {Septiembre, 2010}, disponible en: [http://www.um.es/pcgum/PFCs\\_y\\_TMs/2009memoriaTM\\_COHERENS.pdf](http://www.um.es/pcgum/PFCs_y_TMs/2009memoriaTM_COHERENS.pdf).

Luyten, P, Jones, J, Proctor, R, Tabor, A, Tett, P, Wild-Allen, K. 1999.COHERENS: A Coupled Hydrodynamical-Ecological Model for Regional and Shelf Seas. User Documentation.

Luyten, P.J., Jones, J.E., Proctor, R., Tabor, A., Tett, P., Wild-Allen, K., 1999. COHERENS Documentation. A coupled Hydrodynamical– Ecological Model for Regional and Shelf Seas: User Documentation. MUMM Report, Management Unit of the Mathematical Models of the North Sea, Belgium. 911 pp. (Available on CD-ROM via <http://www.mumm.ac.be/coherens>)

Magaud H., Migeon B., Morfin P., Garric J., y Vindimian E., (1997) Modelling fish mortality due to urban storm run-off: interacting effects of hypoxia and un-ionized ammonia. Water Resources, vol 31, pp 211 – 218

MARETEC (Marine and Environmental Technology Center) {Enero 2011} disponible en: [www.maretec.mohid.com](http://www.maretec.mohid.com).

Mateus S. (2011) Determinación de la Influencia de los Factores Hidrodinámicos y de Calidad del Agua en la Demanda Béntica de la Cuenca alta del río Bogotá. Tesis de Maestría en Recursos Hidráulicos, director L. A. Camacho.

MESA DE EXPERTOS – [2003] Planteamiento de alternativas para el mejoramiento de la calidad ambiental del embalse del Muña (Fase I)

Nakamura Y., Heinz G.S., Effect of Flow Velocity on Sediment Oxygen Demand: Theory Journal of environmental engineering. Vol 120 No.5, pag 996 – 1013.

Pelletier G y Chapra S (2006), Qual2Kw theory and documentation (version 5.1), A modeling framework for simulating river and stream water quality. Washington State Department of Ecology.

Santos J. (1995) Modelo Hidrodinámico Tridimensional de Circulación Oceánica y de Estuarios. Ph. D, Thesis, Universidad Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico.

Technical University of Lisbon, Water Quality Manual, {Julio, 2011}, disponible en: <http://maretec.mohid.com/PublicData/products/Manuals/WaterQualityModuleManual.pdf>

Thomann, R. V., and Mueller, J. A. (1987). Principles of surface water quality modeling and control, Harper Collins, New York.

UNIANDES – EMGESA [1999] - Impacto ambiental de la suspensión del bombeo del agua del río Bogotá al embalse del Muña.

Walker R. y Snodgrass W. (1986) Model for sediment oxygen demand in lakes. Journal of environmental engineering. Vol 112 No.1, pag 25 – 43.

UNAL-EAAB. (2011). Modelación Dinámica de la Calidad del Agua del Río Bogotá - Plan de Calidad.

---

U.S. Army Corps of Engineers (1986). CE-QUAL-R1: "A Numerical One-Dimensional Model of Reservoir Water Quality"; User's Manual.

Water Resources Engineering. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Sydney. Australia. {Septiembre 2012} disponible en:  
[http://www.civil.usyd.edu.au/courses/civl4615/CIV4615\\_lecture\\_8\\_notes\\_PART1.pdf](http://www.civil.usyd.edu.au/courses/civl4615/CIV4615_lecture_8_notes_PART1.pdf)